

Aus der Abteilung für Kieferorthopädie und Orthodontie des Zentrums für Zahnmedizin
des Universitätsklinikums Charité der Medizinischen Fakultät
der Humboldt-Universität zu Berlin
Leiter: Prof. Dr. R.-R. Miethke

DISSERTATION

Entwicklung eines Computerprogramms zur Durchführung elektronischer Setups

zur Erlangung des akademischen Grades

doctor medicinae dentariae (Dr. med. dent.)

vorgelegt der Medizinischen Fakultät

der Humboldt-Universität zu Berlin

von Zahnarzt Frank Mertens

geboren am 5.10.1965 in Berlin

Dekan: Prof. Dr. M. Dietel

Gutachter: 1. Prof. Dr. R.-R. Miethke
2. Prof. Dr. R. J. Radlanski
3. Prof. Dr. T. C. Lueth

Datum der Promotion: 4.1.2000

Meiner Familie

1	Einleitung	8
2	Programmentwicklung zur Durchführung elektronischer Setups	12
2.1	Zum Programm „VirtSet“	12
2.1.1	Die Programmiersprache C++	12
2.1.2	Anforderungen an Hard- und Software	13
2.1.3	Programmerstellung	14
2.1.4	Logik des Programms „VirtSet“	15
2.1.5	Datenformate des Programmes „VirtSet“	17
2.1.5.1	Datenformat der Patientendatei	17
2.1.5.2	Datenformat der Objektdatei	17
2.2	Beispieldaten	20
2.2.1	Datenerfassung	20
2.2.1.1	Datenerfassung mit dem Meßmikroskop	20
2.2.1.2	Messen der Daten	21
2.2.2	Datenformate	22
2.2.2.1	Datenformate der Meßapparatur	22
2.2.2.2	Abgeleitete Datenformate	24
2.2.3	Logik des Programmteils „Objekt erstellen“	25
2.3	Mathematische Problemlösungen	25
2.3.1	Transformation	25
2.3.2	Kommutativgesetz bei Matrixrechnung	26
2.3.3	Rückberechnung aller Stellungsänderungen aus der Anfangs- und Endposition der Objekte	27
2.3.4	Schnittberechnung	30
2.3.5	Berechnungen bei der Artikulation	34
2.3.6	Kontaktpunktberechnung	37
2.3.7	Berechnungen im Programmteil „Objekt erstellen“	38
2.3.8	Schnittpunktberechnung	39
2.3.9	Berechnung der Achsen	40
2.3.10	Berechnungen bei der Zuordnung der Spezialpunkte	41
2.4	Bedienungsanleitung	42

2.4.1	Grundsätzliche Bedienungshinweise	42
2.4.2	Bedienungsanleitung Hauptmenü	43
2.4.2.1	Menüpunkt: Datei	43
2.4.2.1.1	Unterpunkt: Öffnen	43
2.4.2.1.2	Unterpunkt: Drucke aktive Ansicht	45
2.4.2.1.3	Unterpunkt: Drucke alle Veränderungen	46
2.4.2.1.4	Unterpunkt: Ende	46
2.4.2.2	Menüpunkt: Ansicht	46
2.4.2.2.1	Unterpunkte: Ausgabe 1, Ausgabe 2, Ausgabe 3	47
2.4.2.2.2	Unterpunkt: Zahnschema	48
2.4.2.2.3	Unterpunkt: Rotieren	49
2.4.2.2.4	Unterpunkt: Verschieben	49
2.4.2.2.5	Unterpunkt: Kontakt	50
2.4.2.2.6	Untermenü: Hauptebenen	51
2.4.2.2.6.1	Unterpunkt: Sagittalebene	51
2.4.2.2.6.2	Unterpunkt: Frontalebene	51
2.4.2.2.6.3	Unterpunkt: Horizontalebene	52
2.4.2.2.7	Unterpunkt: Kauebene	52
2.4.2.2.8	Unterpunkt: Originalposition dazu	53
2.4.2.2.9	Unterpunkt: Achsen	53
2.4.2.2.10	Unterpunkt: Oberkiefer	53
2.4.2.2.11	Unterpunkt: Unterkiefer	53
2.4.2.3	Menüpunkt: Zahn	54
2.4.2.3.1	Unterpunkt: Aktiver Zahn	54
2.4.2.3.2	Unterpunkt: Extrahieren	55
2.4.2.3.3	Unterpunkt: Veränderung Ausgabe	55
2.4.2.3.4	Unterpunkt: Prüfe Überschneidungen	56
2.4.2.3.5	Unterpunkt: Bemaßung	56
2.4.2.4	Menüpunkt: Extras	57
2.4.2.5	Menüpunkt: Parameter	57
2.4.2.5.1	Unterpunkt: Ausschnitt verkleinern	58

2.4.2.5.2	Unterpunkt: Ausschnitt vergrößern	58
2.4.2.5.3	Unterpunkt: Fenster, Parameter	58
2.4.2.5.4	Unterpunkt: Material, Farben	60
2.4.2.5.5	Unterpunkt: Material, Eigenschaften	63
2.4.2.5.6	Unterpunkt: Licht	63
2.4.2.5.7	Unterpunkt: Ebenen, Farben	64
2.4.2.5.8	Unterpunkt: Kauebene, Parameter	64
2.4.2.5.9	Unterpunkt: Bemaßung	65
2.4.2.5.10	Unterpunkt: Abstandswerte	66
2.4.2.6	Menüpunkt: Rückgängig	66
2.4.2.7	Menüpunkt: ?	67
2.4.3	Bedienungsanleitung Programmteil „Artikulation“	68
2.4.3.1	Menüpunkt: Ende	68
2.4.3.1.1	Unterpunkt: Zurück	68
2.4.3.2	Menüpunkt: Artikulation	69
2.4.3.3	Menüpunkt: Parameter	69
2.4.3.3.1	Unterpunkt: Artikulation anzeigen	69
2.4.3.3.2	Unterpunkt: Artikulation berechnen	70
2.4.3.3.3	Unterpunkt: Artikulation Optionen	71
2.4.4	Bedienungsanleitung Programmteil „Strippen“	72
2.4.4.1	Menüpunkt: Ende	73
2.4.4.1.1	Unterpunkt: Zurück	73
2.4.4.2	Menüpunkt: Aktion	73
2.4.4.2.1	Unterpunkt: Bereichsprüfung	73
2.4.4.2.2	Unterpunkt: Zahnpaar	73
2.4.4.2.3	Unterpunkt: Nächstes Paar	75
2.4.4.2.4	Unterpunkt: Vorheriges Paar	76
2.4.4.2.5	Unterpunkt: Strippen	76
2.4.4.2.6	Unterpunkt: Drucken	76
2.4.4.3	Menüpunkt: Parameter	76
2.4.4.3.1	Unterpunkt: Ansicht vestibulär	77

2.4.4.3.2	Unterpunkt: Ansicht okklusal	77
2.4.4.3.3	Unterpunkt: Ansicht oral	78
2.4.4.3.4	Unterpunkt: Zentriere Zahn 1	78
2.4.4.3.5	Unterpunkt: Zentriere Zahn 2	78
2.4.4.3.6	Unterpunkt: Zentriere Schnittebene	78
2.4.4.4	Menüpunkt: Rückgängig	78
2.4.5	Bedienungsanleitung Programmteil „Objekt erstellen“	79
2.4.5.1	Bedienungshinweise	79
2.4.5.2	Menüpunkt Ende	80
2.4.5.2.1	Unterpunkt: Zurück	80
2.4.5.3	Menüpunkt: Datei	80
2.4.5.3.1	Unterpunkt: Öffnen Punktedatei	80
2.4.5.3.2	Unterpunkt: Sichern Punktedatei	80
2.4.5.3.3	Unterpunkt: Öffnen Objektdatei	81
2.4.5.3.4	Unterpunkt: Sichern Objektdatei	81
2.4.5.3.5	Unterpunkt: Sichern Miniobjektdatei	81
2.4.5.3.6	Unterpunkt: Erstelle Parameterdatei neu	81
2.4.5.4	Menüpunkt: Punkteobjekt	82
2.4.5.4.1	Unterpunkt: Symmetrieren	82
2.4.5.4.2	Unterpunkt: Punktreduktion	82
2.4.5.4.3	Unterpunkt: Punkt einfangen	83
2.4.5.4.4	Unterpunkt: Punkt einfügen	83
2.4.5.4.5	Unterpunkt: Punkt berechnen	83
2.4.5.5	Menüpunkt: Konstruktion	84
2.4.5.5.1	Unterpunkt: Wurzelansatz	84
2.4.5.5.2	Unterpunkt: Zahnkrone erstellen	85
2.4.5.5.3	Unterpunkt: Zahnwurzel zufügen	85
2.4.5.5.4	Unterpunkt: Zahn Spezialpunkte einfügen	85
2.4.5.5.4.1	Drucktaste: Datei laden	85
2.4.5.5.4.2	Drucktaste: neuen Spezialpunkt eingeben	85
2.4.5.5.4.3	Drucktaste: Spezialpunkt kopieren	86

2.4.5.5.4.4	Drucktaste: alten Spezialpunkt verändern	87
2.4.5.5.5	Unterpunkt: Zahn Achszuordnung	87
2.4.5.5.6	Unterpunkt: Zahn Y-Achse spiegeln	87
2.4.5.5.7	Unterpunkt: Normalvektoren berechnen	88
2.4.5.5.8	Unterpunkt: Kiefer erstellen	88
2.4.5.5.9	Unterpunkt: Kiefer Spezialpunkte einfügen	88
2.4.5.5.10	Unterpunkt: Kiefer Achszuordnung	88
2.4.5.5.11	Unterpunkt: Spezialpunkte zuordnen	89
2.4.5.6	Menüpunkt: Parameter	90
2.4.5.6.1	Unterpunkt: Beleuchtet	90
3	Diskussion	91
3.1	Genauigkeit	91
3.1.1	Genauigkeit bei der Oberflächenberechnung	91
3.1.2.	Rundungsfehler	92
3.1.2	Interne Rechengenauigkeit	92
3.1.3	Genauigkeit der Beispieldaten	93
3.2	Geschwindigkeit	93
3.3	Handhabbarkeit	94
3.4	Ungelöste Probleme	96
3.5	Praxisreife	96
4	Zusammenfassungen	97
4.1	Zusammenfassung	97
4.2	Summary	97
5	Literaturverzeichnis	99

1 Einleitung

Computer haben in den letzten Jahren in unserer Gesellschaft einen enormen Stellenwert erhalten. Die medizinischen Wissenschaften konnten sich dieser Entwicklung nicht verschließen. Computer dienen der Diagnostik und der Simulation von chemischen, physikalischen und komplexen biologischen Vorgängen. Von der Computersimulation verspricht man sich, bei niedrigen Kosten und Reproduzierbarkeit von Ergebnissen, mögliche Effekte genau definierter Faktoren auf ein kybernetisches System prüfen und daraufhin ein individuell optimales Ergebnis erreichen zu können.

In der Medizin gibt es beispielsweise die computerunterstützte Operationsplanung und -durchführung bei intrakraniellen Operationen [20]. Derartige Simulationen sind in der Zahnmedizin noch wenig verbreitet, obwohl sich etliche Anwendungsfelder beispielsweise in den Bereichen Chirurgie, Gnathologie und Kieferorthopädie finden ließen.

Nur im Bereich der Prothetik und Zahnerhaltung haben sich inzwischen einige Firmen mit ihren CAD/CAM-Systemen etablieren können [2].

Mit dem CEREC-System (Firma SIEMENS) ist es möglich, direkte Inlays herzustellen, die über ein CAD/CAM-System aus einem Keramikblock gefräst werden, wobei über eine intraorale Kamera digitalisierte Bilder der Präparation gewonnen werden.

Das CICERO-CAD/CAM-System dient der Herstellung von Kronen- und Brückenprothetik und ist sogar in der Lage, mit individuellen Kiefergelenksbahnen verschiedene Artikulationsbewegungen an den virtuellen Restaurationen zu überprüfen [29].

Für den Bereich der Kieferorthopädie entwickelte die Firma BENDING ART MEDIZINTECHNIK eine Drahtbiegemaschine (bending art system), die ebenfalls auf einer CAD/CAM-Anwendung beruht. Die Bracketpositionen auf den Gipsmodellen eines Patienten werden mit Hilfe von Übertragungsplatten gescannt. Über die auf den Übertragungsplatten liegenden Markierungen ermittelt das CAD-Programm die Bracket- und Zahnposition. Interaktiv wird ein idealisierter Bogen berechnet und durch die Biegemaschine fertiggestellt.

Das Setup bezeichnet in der Zahnheilkunde die Simulation eines Behandlungsergebnisses bei einem gegebenen Ausgangszustand. Obwohl einiges an zahnmedizinischer Therapie simuliert werden könnte, kennt man das Setup nur im Bereich der Chirurgie und Kieferorthopädie.

Hier werden das

- diagnostische, das
- therapeutische und das
- kephalometrische Setup

unterschieden.

KESLING prägte zuerst den Begriff des diagnostischen Setups und führte zugleich die erste Begriffsverwirrung herbei, da er das Setup als Therapie, nämlich zur Herstellung des von ihm entwickelten Positioners benutzte. Im allgemeinen versteht man unter einem diagnostischen Setup die Veränderung eines Modells aus Gips, Epoxidharz oder ähnlichem, so daß ein Endzustand simuliert wird, um beispielsweise verschiedene Varianten einer Extraktionstherapie vergleichen zu können [12-14, 28].

Nach DRESCHER[7] und DRESCHER und HOLTKAMP[8] dient das diagnostische Setup folgenden Fragestellungen:

- Wie groß ist der Platzbedarf?
- Sind Extraktionen erforderlich?
- Welche Zähne sollen extrahiert werden?
- Welche Zahngruppen müssen bewegt werden?
- Wie groß ist der Verankerungsbedarf?

Demgegenüber dient das therapeutische Setup der Herstellung funktioneller Geräte wie Positioner, Idealisator oder Spring Aligner und unterscheidet sich vom diagnostischen Setup durch die Fragestellung und eventuell durch eine Überkorrektur der durchgeführten Zahnbewegungen, um einem möglichen Rezidiv entgegenzuwirken oder um ausreichende Kräfte zu einer idealisierenden Bewegung zu entwickeln [13, 22, 24].

Außerdem wird das therapeutische Setup durchgeführt, um eine ideale Bracketposition für die Straight-Wire-Technik[1] zu finden.

Das kephalometrische Setup stellt die Simulation der skelettalen Veränderungen durch Wachstum, kieferorthopädische und -chirurgische Therapie am Fernröntgenseitenbild dar. Im Gegensatz zu den beiden erstgenannten Setup-Formen ist dieses jedoch nur zweidimensional.

MARXER versuchte durch Schablonen einen Informationsaustausch zwischen Setup-Modell und FRS zu erhalten, indem er die Modell-Okklusionsebene und die entsprechende Durchzeichnung

am FRS als Referenz betrachtete. Die Informationsübertragung wurde mit Hilfe einer individuell angefertigten Übertragungslehre sowohl vom Modell zum FRS als auch vom FRS zum Modell durchgeführt [17].

BURSTONE und BIGGERSTAFF stellten computerisierte Setups vor [3, 5, 6]. Diese Systeme stellen die Veränderung der Zahnbögen beider Kiefer nur sehr schematisch in der Okklusionsebene dar. Statt vollständiger, anatomisch geformter Zähne werden nur deren Umrißlinien am Bildschirm gezeigt. Diese Zahnobjekte können in ihrer Längsachse rotiert und in der Okklusionsebene bewegt werden. Das System von BURSTONE soll in der Lage sein, eine Fernröntgendurchzeichnung mit einer Lateralphotographie zu überlagern; der Computer berechnet jedoch jeweils kein dreidimensionales Setup. Der Benutzer ist auf sein räumliches Vorstellungsvermögen angewiesen.

MEYER et al. berichteten 1989 über ein Computerprogramm, mit dem sie die Bewegungen einzelner Zähne und Zahngruppen dreidimensional simulierten [19]. Allerdings konnten sie nur auf manuell eingelesene Zahndaten zurückgreifen, die sie aus Modellfotos in drei Ebenen und FRS-Durchzeichnung erhielten. Ihre Zähne wurden auf der Basis der individuellen Approximalpunkte und des Apexpunktes durch Modifikation „konfektionierter“ Zahndaten berechnet. Den Verlauf des knöchernen Limbus alveolaris erhielten sie aus einer OPTG-Durchzeichnung. Das Ziel der Autoren war es, Kräftesysteme und Drehmomente bei orthodontischen Zahnbewegungen darzustellen und die sich daraus ergebenden Zahnstellungsänderungen zu prognostizieren. Aus Mangel an Speicherplatz des von ihnen verwendeten Computers konnten sie jeweils nur einen Kiefer betrachten.

Die Schwäche der existierenden Programme - mit Ausnahme des Systems von KURODA et al. [16] - beruht auf der Digitalisierung der Modelle, die in den meisten Fällen mit der Hand vorgenommen wurde, zum Teil direkt vom Modell und zum Teil vom Foto. Keine Berücksichtigung fanden die Weichteile und die umgebenden knöchernen, die Zahnbewegungen einschränkenden Strukturen.

Die kommerziellen CAD/CAM-Systeme [2], sowie das System von KURODA et al. [16] lesen heute überwiegend im Mund oder auf einem Gipsmodell die Daten mit Hilfe eines Lasertriangulationsverfahren ein. Im Rahmen des Forschungsprojektes CAMA (Computer-Assistiert-Model-Analysis) zwischen der Freien Universität Berlin und der Humboldt-Universität zu Berlin wurde ebenfalls ein Lasertriangulationsverfahren entwickelt, das in der Lage ist, ein Gipsmodell zu vermessen [21]. Eine Kamera nimmt die vom Laser aufs Objekt geworfene Linie auf und ein

angeschlossener Computer bestimmt aus deren Verzerrung die dreidimensionalen Objektkoordinaten. Ein bislang ungelöstes Problem ist die Zerlegung eines digitalisierten Kiefer- oder Modellobjektes in einzelne Zahnobjekte. Die auf dem Lasertriangulationsverfahren beruhenden Digitalisierungssysteme sind nicht in der Lage, nicht sichtbare Bereiche, wie Zahnwurzeln oder Kieferhöhlen, zu vermessen und haben häufig Schwierigkeiten, untersichgehende Bereiche und Engstellen wie im Interdentalbereich zu erkennen. Hier ist die Entwicklung des Dental-CTs und dessen Erweiterung zur dreidimensionalen Objektbeschreibung sehr zu begrüßen [27], wenngleich die damit verbundene Strahlenbelastung einer weiteren Anwendung entgegensteht.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung von Algorithmen zur Simulation eines kieferorthopädischen Setups und deren Umsetzung in ein Computerprogramm. Damit wird die Grundlage geschaffen, um in einem späteren Entwicklungsschritt das Wissen um das Ausmaß der Zahnstellungsänderung zwischen Ausgangssituation und idealem Setup zu nutzen, um

- Brackets so zu kleben, daß mit einer echten Straight-Wire-Apparatur die ideale Zahnstellung erreicht wird, und
- in Kenntnis der nötigen Zahnbewegungen durch ein geeignetes Bogendesign mit optimalen Kraftsystemen zu arbeiten.

Das Programm soll erlauben,

- Zähne und Zahngruppen im Rahmen ihrer anatomischen Möglichkeiten zu verschieben und zu rotieren,
- Zähne zu extrahieren,
- die aus Zahnstellungsänderungen resultierende Okklusion und Artikulation zu prüfen,
- approximale Einschleifmaßnahmen durchzuführen,
- Veränderungen qualitativ und quantitativ auszugeben und
- reale Zwischen- und Endstadien einer kieferorthopädischen Behandlung mit dem simulierten Ergebnis zu vergleichen.

Um das Programm testen zu können, ist im Rahmen dieser Arbeit ein Beispieldatensatz erstellt worden.

2 Programmentwicklung zur Durchführung elektronischer Setups

2.1 Zum Programm „VirtSet“

Das Programm „VirtSet“ und die beschriebenen Beispieldaten sind dieser Arbeit auf CD-Rom beigelegt. Zur Installation siehe **Anhang, CD-ROM** auf Seite 107.

2.1.1 Die Programmiersprache C++

Die Programmiersprache C++ wurde aus der Programmiersprache C (im weiteren kurz C beziehungsweise C++ genannt) entwickelt. C wurde im Jahre 1978 vorgestellt [10, 11]. Diese Programmiersprache hat sich seither zur Standardsprache der neuen Personalcomputer und großer Zentraleinheiten entwickelt. C wurde für allgemeine Anwendungen entwickelt und enthält sehr wenige Einschränkungen. Da C relativ maschinennah konzipiert ist, das heißt in ihrer Struktur der Architektur heutiger Rechner ähnelt, laufen in C entwickelte Programme sehr schnell und sind gleichzeitig sehr kompakt. C wurde inzwischen standardisiert (ANSI C, ISO 9899, FIPS 160). Jeder C-Compiler kann einen im ANSI-Standard geschriebenen Quellcode übersetzen.

Die Programmiersprache C++ ist eine Erweiterung von C um Klassen. C++ erlaubt ein objekt-orientiertes Programmieren. Die meisten Betriebssysteme und professionelle Anwendungen werden heutzutage in den Sprachen C oder C++ entwickelt. Es existiert bislang nur eine amerikanische Standardisierung von C++ nach ANSI. Zu einer internationalen Einigung ist es bislang nicht gekommen. Aus diesem Grunde sind Entwicklungen unter verschiedenen Programmieroberflächen wie VISUAL C++ oder BORLAND C++ nicht beliebig austauschbar.

2.1.2 Anforderungen an Hard- und Software

Das Programm „VirtSet“ ist lauffähig auf einem Personalcomputer mit folgenden Voraussetzungen:

- Intel® - basierender Hauptprozessor, möglichst Pentium mit mindestens 120 MHz,
- mindestens 32 MByte RAM Hauptspeicher,
- Festplatte mit einer Speicherkapazität von mehr als 200 Mbyte,
- CD-ROM Laufwerk zur Installation,
- Graphikkarte mit einer Darstellung von mindestens 65536 Farben
- (möglichst OpenGL®-optimiert),
- mindestens 17 Zollmonitor (entsprechend 43,18 cm Bildschirmdiagonale),
- Tastatur und Maus mit zwei Drucktasten ,
- möglichst Farbdrucker.

Als Betriebssystem wird WINDOWS NT® 4.0 oder höher, beziehungsweise WINDOWS 95® mit OpenGL®-Unterstützung oder höher verlangt.

2.1.3 Programmerstellung

Bei der Programmerstellung wurde darauf geachtet, im ANSI-Standard der Programmiersprache C zu programmieren, damit bei Anpassung an andere Compiler keine syntaktischen Probleme entstehen. Möglichst viele Bereiche wurden in C++-Klassen gekapselt. Alle allgemeinen mathematischen Funktionen, die häufig benutzt wurden, sind in einem Quellcode zusammengefaßt worden, um einen etwaigen Coprozessor zu unterstützen oder um diesen Programmteil in schnelle Maschinensprache umsetzen zu können (Dateien `f_rechne.cpp` und `f_rechne.h`).

Um eine bessere Übersicht zu erhalten, wurden die in der Programmiersprache C möglichen extremen Verkürzungen nicht benutzt. Das Programm wurde möglichst strukturiert entworfen; sogenannte GOTO-Befehle sind deshalb nicht enthalten. Um das Programm zu entlasten und zu vereinfachen, wurden viele von dem Entwicklungssystem VISUAL C++® angebotenen MFC-Klassen an Stelle der WINDOWS-spezifischen API-Aufrufe genutzt.

Dateien:

Der Quellcode ist in den Dateien mit der Extension `*.cpp` gespeichert. Die Dateien mit der Extension `*.h` sind Header-Dateien, die notwendige Definitionen enthalten.

<u>Datei:</u>	<u>Inhalt:</u>
<code>set.cpp</code>	Startpunkt der Programmausführung
<code>mainfrm.cpp</code>	Hauptmenü
<code>ansicht.cpp</code>	Ansichtfenster
<code>aufbob.cpp</code>	Objekt erstellen
<code>artikula.cpp</code>	Artikulationsberechnung
<code>bars.cpp</code>	Werkzeuge
<code>dialoge.cpp</code>	Dialogfenster
<code>f_rechne.cpp</code>	Ausgelagerte mathematische Routinen
<code>rechne.cpp</code>	Spezielle Berechnungen
<code>in_out.cpp</code>	Dateioperationen
<code>param.cpp</code>	Initialisierungen der VirtSet.ini-Datei
<code>setup.cpp</code>	Kontaktberechnungen
<code>strip.cpp</code>	Strippen
<code>externe.h</code>	Globale Definitionen
<code>protos.h</code>	Klassenlose Funktionen
<code>variable.h</code>	Globale Variablen

2.1.4 Logik des Programms „VirtSet“

Beim herkömmlichen Setup bedient sich der Zahntechniker eines Artikulators mit fixiertem Ober- und Unterkiefermodell. Die Definition dieser Installation erfolgt über einen Übertragungsbogen. Beim SAM®-Artikulator sind die schädelbezogenen Referenzpunkte die Glabella (über die Glabellastütze) und die beiden Pori acustici externi. Die Stellung des Oberkiefers zu diesen Referenzpunkten wird über eine Bißgabel ermittelt. Der Unterkiefer wird mit Hilfe von Registraten in Beziehung zum Oberkiefer gesetzt.

Bei der elektronischen Realisierung wird ein kartesisches Weltkoordinatensystem definiert, in welches Ober- und Unterkiefer sowie die Kondylen mit ihren Gelenkbahnen eingebettet sind. Die jeweilige axiale Ausrichtung entspricht den Achsen im Schädelbereich bezüglich der Median-sagittal-, der Horizontal- und der Frontalebene. Im vorliegenden Programm zeigt die X-Achse vom Patienten aus gesehen nach rechts, die Y-Achse nach oben und die Z-Achse nach hinten im virtuellen Kopf. Da der Computer primär nur mit abstrakten Zahlenwerten rechnet, ist eine Bemaßung der Achsen entsprechend der realen Dimension erforderlich.

Ober- und Unterkiefer erhalten beim Digitalisieren ihr eigenes Koordinatensystem. Die Stellung der Kiefer im Weltkoordinatensystem wird durch Matrizes bestimmt. Die Definition der Stellung des Oberkiefers wird wichtig zum Beispiel bei Osteotomien nach LeFort, die des Unterkiefers schon bei Artikulationsbewegungen.

Jeder Zahn besitzt für sich eine konstante Form, wenn man von Veränderungen durch traumatische und artifizielle Einflüsse absieht. Es wird primär nur seine Stellung im Kiefer während einer kieferorthopädischen Behandlung verändert. Im Programm erhält jeder Zahn ein eigenes Koordinatensystem; seine Morphologie bezieht sich auf dieses. Die axiale Ausrichtung des Zahnkoordinatensystems bezieht sich auf die zahnärztlichen Richtungsbezeichnungen:

- die positive X-Achse entspricht der Richtung mesial,
- die negative X-Achse entspricht der Richtung distal,
- die positive Y-Achse entspricht der Richtung oral im 1. und 3. Kieferquadranten, sonst der Richtung vestibulär,
- die negative Y-Achse entspricht der Richtung vestibulär im 1. und 3. Quadranten, sonst der Richtung oral,
- die positive Z-Achse entspricht der Richtung apikal und
- die negative Z-Achse entspricht der Richtung okklusal oder inzisal.

Freie Bewegungen stellen die Summe der Einzelbewegungen für diese Richtungen dar.

Die Stellung jedes Zahnes im Einzelkiefer wird ebenfalls durch Matrizes bestimmt. Da die virtuellen Zähne feste Rotationsachsen besitzen, sind Kippungen um andere Rotationsachsen Kombinationen aus Rotation und Verschiebung.

Die mathematische Beschreibung virtueller Zähne stellt in diesem Programm ein Oberflächenraster dar, wobei man jeweils eine Oberflächenqualität pro Flächenelement, zum Beispiel Zahnschmelz oder Wurzelzement definieren kann. Es wird keine Aussage getroffen über tiefere Bereiche wie Pulpa oder Wurzelkanäle.

Die mathematische Beschreibung des virtuellen Alveolarkammes ist ebenfalls ein Oberflächenraster, wobei dieses je nach Datenerfassung ein Gingiva- (Gipsmodell) oder Knochenmodell (Ultraschall, CT) darstellt.

Beim Oberflächenraster wird über die reale Form ein Punktenetz gelegt. An den Punkten stimmen reales und virtuelles Objekt überein. Die zwischen den Punkten liegenden realen Bereiche werden beim virtuellen Objekt interpoliert. In dem Programm „VirtSet“ werden aus jeweils drei Punkten, die einander benachbart sind, Dreiecksflächen gebildet, die plan sind. Dreiecksflächen haben den Vorteil, mathematisch wie Ebenenelemente betrachtet werden zu können. Da die realen Bereiche jedoch gekrümmt sein können, besteht bei höherer Punktedichte eine größere Übereinstimmung zwischen realem und virtuellem Objekt (siehe **3.1.1. Genauigkeit bei der Oberflächenberechnung** auf Seite 91).

Kontaktsuche:

Bewegt man zwei virtuelle Zähne aufeinander zu, endet diese Bewegung nicht bei Berührung wie beim realen Geschehen. Man muß vielmehr prüfen, ob ein gegenseitiger Schnitt vorliegt, und dann die Bewegungsmöglichkeit begrenzen (siehe **2.3.8. Schnittpunktberechnung** auf Seite 39).

Ansicht:

Es werden die Berechnungen zwar dreidimensional durchgeführt, die Ausgabe über Bildschirm oder Drucker jedoch erfolgt zweidimensional. Durch gleichzeitig dargestellte Ansichten aus verschiedenen Richtungen kann man das Erscheinungsbild verbessern. Die Denkleistung des EDV-Benutzers für die geistige geometrische Einordnung ist jedoch eine wesentlich höhere als beim realen Setup am Gipsmodell.

2.1.5 Datenformate des Programmes „VirtSet“

2.1.5.1 Datenformat der Patientendatei

Die Patientendatei (Beispieldatei: frasaco.mts) enthält Informationen über den Patienten, das Datum der Datenerfassung und Informationen über vorhandenen Datensätze der einzelnen Kiefer und Zähne.

Die Datei baut sich folgendermaßen auf:

1. Name des Patienten (30 Zeichen).
2. Vorname des Patienten (30 Zeichen).
3. Geburtsdatum des Patienten als DATE-Struktur (siehe **6.1. Glossar** auf Seite 101).
4. Erstellungsdatum des Datensatzes als DATE-Struktur.
5. Liste, die als Einträge jeden Zahn, Ober- und Unterkiefer und für jeden Eintrag ein Bitfeld mit folgenden Eintragungen enthält:
 1. ob der Zahn- oder Kieferdatensatz vorhanden ist,
 2. ob das Zahn- oder Kieferobjekt für die Darstellung in den Ansichtsfenstern ausgewählt wurde,
 3. ob das Zahnobjekt als extrahiert vermerkt ist,
 4. ob der Datensatz eines gestrippten Zahnes geladen wird und
 5. ob das Zahnobjekt als „aktiver Zahn“ ausgewählt wurde.

2.1.5.2 Datenformat der Objektdati

Die Objektdati enthält Informationen über Punkte, Kanten und Flächen eines Zahn- oder Kieferobjektes.

Die Datei baut sich folgendermaßen auf:

1. Internationale Zahnbezeichnung oder eine Kieferbezeichnung (im Programm definiert als „_OK_WERT=99“ für den Oberkiefer und „_UK_WERT=111“ für den Unterkiefer).
2. Punktstruktur für den Ursprungspunkt des spezifischen Koordinatensystems.
3. Struktur für die Spezialpunkte.

4. tatsächliche Anzahl der Punkte.
5. tatsächliche Anzahl der Kanten.
6. tatsächliche Anzahl der Flächen.
7. Liste von Punktstrukturen für die einfachen Punkte (Anzahl definiert als „MAXPUNKTE =4000“).
8. Liste von Flächenstrukturen (Anzahl definiert als „MAXFLAECHE =8000“).
9. Liste von Kantenstrukturen (Anzahl definiert als „MAXKANTEN =12000“).

Die einzelnen Unterstrukturen haben folgenden Aufbau:

- Punktstruktur für die einfachen Punkte:
 1. 4 Long-Variablen für die globalen Koordinaten. Diese enthalten die objektspezifischen Koordinaten eines Punktes.
 2. 4 Long-Variablen für die Weltkoordinaten. Diese nehmen transformierte Koordinaten eines Punktes auf.
 3. 4 Fließkomma-Variablen für die Koordinaten der globalen Punktnormalvektoren.
 4. 4 Fließkomma-Variablen für die transformierten Koordinaten der Punktnormalvektoren.
- Punktstruktur für die Spezialpunkte:
 1. 4 Long-Variablen für die globalen Koordinaten. Diese enthalten die objektspezifischen Koordinaten eines Punktes.
 2. 4 Long-Variablen für die Weltkoordinaten. Diese nehmen transformierte Koordinaten eines Punktes auf.
- Struktur für die Spezialpunkte:
 1. Anzahl der Spezialpunkte.
 2. Liste von Punktstrukturen für die Spezialpunkte (Anzahl definiert als ANZAHL_SPEZIALPUNKTE=100).

- Flächenstruktur:
 1. Wert für die Sichtbarkeit der Fläche(Werte: sichtbare Fläche=0, Konturfläche=1,nicht sichtbare Fläche=2).
 2. Wert für die Flächenorientierung (Die Reihenfolge der drei Flächenpunkte bestimmt sich bei Blick auf die Außenfläche. Werte: rechts herum=0, links herum=1, keine Reihenfolge definiert=2).
 3. 4 Fließkomma-Variablen für die Koordinaten des globalen Flächennormalvektors.
 4. 4 Fließkomma-Variablen für die transformierten Koordinaten des Flächennormalvektors.
 5. Wert für die Flächenart (Wert: beispielsweise Schmelz=0, Wurzel=1, Alveolar-knochen=2).
 6. Wert für den Bewegungswiderstand (wird im Programm nicht verwendet).
 7. Liste von drei Punktnummern, die auf die Punkte in der Punktliste verweisen, aus denen die Dreiecksfläche begrenzt wird.
 8. Fließkommazahl für den Flächeninhalt.

- Kantenstruktur:
 1. Punktnummer der Punktliste für den Anfangspunkt der Kante.
 2. Punktnummer der Punktliste für den Endpunkt der Kante.
 3. Liste von zwei Flächennummern der Flächenliste für die Begrenzungsflächen der Kanten.
 4. Liste von zwei Werten für die Kantenorientierung bezogen auf die Orientierung der beiden Begrenzungsflächen (Werte: rechts herum=0, links herum=1, keine Reihenfolge definiert=2). Die beiden Kantenorientierungswerte dürfen nicht gleich sein, da sonst an einer Kante eine Innenfläche und Außenfläche aufeinanderstoßen würden.

Die Implementierung liegt in der Datei „externe.h“ im Ordner „Source“ der beigelegten CD-ROM.

2.2 Beispieldaten

2.2.1 Datenerfassung

Da am Anfang der Programmentwicklung noch keine Beispieldaten vorlagen, wurde ein CAD-Programm für dentale Fragestellungen entwickelt, um die mathematischen Entwicklungen der vorliegenden Arbeit auf ihre Richtigkeit überprüfen zu können. Die dabei gewonnenen Objekte hatten allerdings geringe Ähnlichkeit mit tatsächlichen Zähnen und besaßen dadurch nur eine begrenzte Aussagekraft. Die Punkteingabe erfolgte mittels der Maus am Computer. Die dreidimensionale Darstellung wurde wie im Programmteil „Objekt erstellen“ durch zwei Fenster erreicht, in denen das zu konstruierende Objekt gleichzeitig von verschiedenen Seiten zu sehen war [18].

Später sollte ein Lasertriangulationsverfahren [21] genutzt werden, um die Beispieldaten zu erhalten. Dieses stellte sich jedoch als nicht ausreichend präzise heraus und war auch nicht in der Lage, Objekte tatsächlich aus allen Richtungen zu vermessen. Wegen dieser Unzulänglichkeiten wurde schließlich die Datenerfassung mit dem „Reflex Mikroskope“ durchgeführt.

2.2.1.1 Datenerfassung mit dem Meßmikroskop

Die Daten für die in dieser Arbeit gezeigten Zähne und Kiefer wurden mit Hilfe des „Reflex Mikroskope“ der Firma REFLEX MEASUREMENT LIMITED ermittelt [23].

Ein solches Mikroskop befindet sich im Besitz der Humboldt-Universität zu Berlin, Abteilung für Kieferorthopädie und Orthodontie. Es ermöglicht in Verbindung mit der dazugehörigen Software C3D (Version März 1995) ein dreidimensionales Vermessen von Objekten.

Das Programm C3D wurde auf einem Laptop, Dell Latitude 433c, ausgeführt, da sich die gesamte Meßapparatur im Zusammenhang mit der Stromversorgung des Meßraumes als sehr störanfällig erwies. Bei Spannungsschwankungen und größeren Motorbewegungen kam es zu „Abstürzen“. Der Computer wurde durch eine serielle Verbindung an die Meßapparatur angeschlossen. Das Mikroskop ist vollkommen motorgesteuert und mit Meßfühlern ausgestattet. Der Objektträger besitzt zwei Motoren zur Steuerung der X- und Y-Achsen. Die Motorsteuerung der Höhenverstellung des Objektivs erlaubt eine Einstellung in Z-Achsenrichtung.

Mit Hilfe einer starken Leuchtdiode wird ein Lichtpunkt in die Optik gespiegelt. In beiden Okularen ist dieser zentral zu sehen. Dieser Lichtpunkt dient zur Bestimmung des richtigen

Linsen-Objekt-Abstandes (der Höhe), der erreicht ist, wenn die Lichtpunkte in jedem Okular für den Betrachter - bei entspannter Sicht in die Ferne - verschmelzen.

Je nach gewünschter Genauigkeit kann man eine Lichtpunktgröße von 5, 10 oder 20 μm einstellen. Die Motorsteuerung erfolgt in Mikrometerschritten. Die Ausgabe geschieht in Millimetern mit einer Auflösung von 1 μm , wobei anstelle des Kommas ein im englischen Sprachraum üblicher Punkt gesetzt wird.

Es besteht die Möglichkeit, drei verschiedene Arten von Punkten zu messen:

- **Bezeichnete Punkte:** Man gibt den Meßpunkten einen Namen, durch den sie identifiziert werden können. Die Namen dienen vor allem dazu, eine Änderung des Objektes auf dem Objektträger zu erlauben, indem mindestens drei schon vermessene bezeichnete Punkte nochmals vermessen werden und der Computer die erfolgte Änderung auf alle noch zu vermessenden Punkte des Objektes überträgt. Dadurch ist es möglich, das Objekt von allen Seiten zu vermessen. Spezialpunkte werden als bezeichnete Punkte vermessen.
- **Unbezeichnete Punkte:** Diese Punkte sind wie die bezeichneten Punkte frei ansteuerbar. Die unbezeichneten Punkte dienen der Vermessung der Zahnwurzeln.
- **Rasterpunkte:** Man legt am Computer ein X-Y-Raster fest, das der Computer am Mikroskop über die Motorsteuerung anfährt. Der Benutzer muß nur noch die Höhe (Z-Achse) für jeden Punkt vermessen.

2.2.1.2 Messen der Daten

Es wurden ein Ober- und ein Unterkiefermodell der Firma FRASACO® sowie die dazugehörigen Zähne 21 bis 27 und 31 bis 37 vermessen.

Pro Kiefer wurden nur die Zähne eines Quadranten vermessen, da bei diesen Daten eine Spiegelsymmetrie angenommen wurde. Die fehlenden Zähne wurden durch Spiegelung der Datensätze ergänzt.

An jedem Zahn wurden auf allen Seiten Markierungen mit einer sehr feinen Sonde angebracht. Dann wurden die Zähne mit einem Graphitpulver bestäubt, um die Reflexion abzuschwächen und um die Markierungen besser vermessen zu können.

Pro Zahn wurden für die klinische Krone zwischen 1500 und 2500 Rasterpunkte bei einer Rasterbreite von 0,3 mm vermessen. Für die Wurzeln wurden unbezeichnete Punkte in etwa 1 mm Abstand vermessen. Zirka 10 bezeichnete Punkte wurden an den vorher angebrachten

Markierungen vermessen, da es nur über diese möglich ist, die Position des zu messenden Objektes zu verändern und die aus verschiedenen Perspektiven aufgenommenen Meßdaten zu überlagern.

Pro Kiefermodell wurden etwa 900 Rasterpunkte mit einer Rasterbreite von 3 mm vermessen. Zusätzlich wurden etwa 10 bezeichnete Punkte je Kiefer erfaßt. Dann wurden die Zähne in die Alveolen gesetzt und an jedem Zahn drei markierte Punkte vermessen, die ebenfalls bei der Messung des isolierten Zahnes vermessen worden waren.

Nun wurden die Kiefer in Zentralokklusion gestellt und drei Punkte verschiedener Zähne des Oberkiefers bezüglich der Meßeinstellung für den Unterkiefer vermessen. Dieses dient dazu, die erhaltenen Einzelkiefer-Datensätze einander zuzuordnen (siehe **2.4.5.5.11. Unterpunkt: Spezialpunkte zuordnen** auf Seite 89).

Abschließend wurde der Oberkiefer in einen SAM-Artikulator in einer ungefähr typischen Position einartikuliert. Dann wurden die Zentren der Kiefergelenksköpfchen und der Mittelpunkt der Verbindungslinie der Infraorbitalpunkte (als Äquivalent der Kontaktpunkt des Stützstifts auf dem Stützstiftteller) vermessen.

2.2.2 Datenformate

2.2.2.1 Datenformate der Meßapparatur

Das zum „Reflex Mikroskope“ gehörende Programm C3D speichert die Meßergebnisse in einer MS-DOS®-Textdatei ohne Formatierung mit der Extension *.xyz. Am Anfang jeder Datei steht der Objektname, aus dem auch der Dateiname gebildet wird, dann Datum und Uhrzeit, so zum Beispiel:

z24_11 28-06-95/14:17

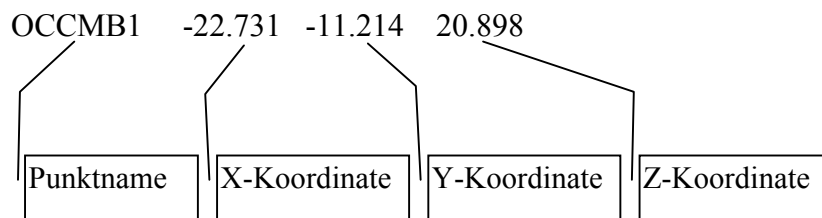
Name: Z24_11	Datum: 28-06-95	Uhrzeit: 14:17
-----------------	--------------------	-------------------

Jede Messung eines Punktes ergibt eine 23 Byte lange Zeile.

Zuerst erscheinen die bezeichneten, dann die unbezeichneten Punkte, schließlich die Rasterpunkte (grid points):

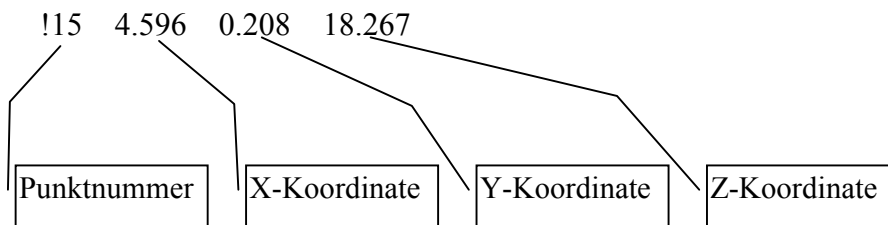
- Bezeichneter Punkt

Zum Beispiel:



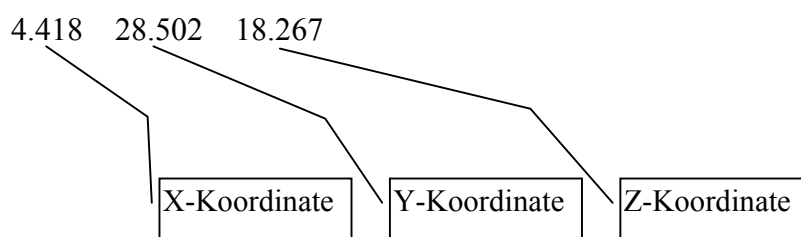
- Unbezeichneter Punkt

Zum Beispiel:



- Rasterpunkt

Zum Beispiel



Teilweise erscheinen Nonsenszeilen, wie:

0 0 00

-1 300.000 -1 300.000 0

Diese scheinen vom C3D-Programm generiert zu werden, wenn eine neue Perspektive eingestellt wird oder wenn es zu einer leichten Störung bei der Motorsteuerung kommt. Die Nonsenszeilen wurden gelöscht.

2.2.2.2 Abgeleitete Datenformate

Die erhaltene Textdatei *.xyz wurde mit Hilfe eines Editors, hier MS Word® 6.0, verändert, und erneut als ASCII-Datei gespeichert.

Leerzeichen wurden grundsätzlich eliminiert und die Koordinaten durch Kommata getrennt. Nonsense- sowie Informationszeilen wurden gelöscht.

Es wurden drei verschiedene Dateien gebildet, je nach Beschaffenheit der gemessenen Punkte:

- Als Datei mit der Extension .spp wurden die bezeichneten Punkte gespeichert :

Zum Beispiel:

,OCCM1,3.889,3.646,28.310

Diese wurden später zu Spezialpunkten verarbeitet.

- Als Datei mit der Extension .wzl wurden die unbezeichneten Punkte gespeichert:

Zum Beispiel:

,3.660,5.919,28.951

Aus diesen wurden später die Wurzelpunkte gebildet.

- Als Datei mit der Extension .xxx wurden die Rasterpunkte gespeichert:

Zum Beispiel:

,3.660,5.919,28.951

Aus diesen wurden später die Kronenpunkte gebildet.

2.2.3 Logik des Programmteils „Objekt erstellen“

Die durch Vermessen der Zahn- oder Kieferobjekte gewonnenen Punkte müssen noch in Beziehung zueinander gesetzt werden. Zwei Punkte bilden Anfangs- und Endpunkte einer Kante. Eine Kante begrenzt immer genau zwei Flächen. Jede Fläche wird durch genau drei Punkte (und drei Kanten) bestimmt. Jede Fläche hat bezogen auf das Objekt eine Außen- und eine Innenseite. Liegen drei Punkte im Uhrzeigersinn, beschreiben sie eine Außenfläche (Korkenzieherregel). Die Kantenorientierung zweier Begrenzungsflächen bezogen auf Anfangs- und Endpunkt einer Kante kann nie gleich sein, sonst würde wie bei einem MÖBIUSSchen Band eine Innenfläche an eine Kante einer Außenfläche grenzen.

2.3 Mathematische Problemlösungen

2.3.1 Transformation

Um einen Zahn entsprechend seinen zahnmedizinischen Richtungsbezeichnungen rotieren und verschieben zu können, sind die Koordinaten seiner Punkte auf ein Koordinatensystem bezogen, das sich an der Morphologie des Zahnes orientiert (siehe **2.3.9. Berechnung der Achsen** auf Seite 40). Die Stellung des Zahnes in seinem Kiefer ergibt sich durch Multiplikation der Zahnkoordinaten mit zwei Matrizes (xx ist die internationale Zahnbezeichnung):

1. Die Matrix „modellMxx“ beschreibt die ursprüngliche Stellung des Zahnes in seinem Kiefer.
2. Die Matrix „aendMxx“ beschreibt die Änderung der Stellung des Zahnes von der ursprünglichen Stellung im Kiefer, die durch Rotationen und Verschiebungen erhalten wurde (siehe **2.3.3. Rückberechnung aller Stellungsänderungen aus der Anfangs- und Endstellung der Objekte** auf Seite 27).

Die Ober- und Unterkiefer erhalten ebenfalls ihre eigenen Koordinatensysteme, damit diese bei Artikulationsbewegungen oder LeFort-Osteotomien unabhängig voneinander verschoben und rotiert werden können. Zur Übertragung der Kiefer- und transformierten Zahnkoordinaten in eine „virtuelle Welt“ stehen wiederum zwei Matrizes zur Verfügung:

1. Die Matrizes „modellMOK“ (für den Oberkiefer) und modellMUK (für den Unterkiefer) beschreiben die ursprüngliche Stellung der Kiefer in der Welt.

2. Die Matrizes „aendMOK“ (für den Oberkiefer) und aendMUK (für den Unterkiefer) beschreiben die Änderung der Stellung der Kiefer von der ursprünglichen Stellung in der Welt.

Alle Berechnungen im Programm „VirtSet“ werden nach der Transformation der Zahn- und Kieferpunkte in Weltkoordinaten durchgeführt.

Um die Zahn- und Kieferobjekte in den Programmfenstern darstellen zu können, müssen die Weltkoordinaten aller Punkte durch die Matrix „WC_DC“ in Fensterkoordinaten übertragen werden (zu Einstellung siehe **2.4.2.5.3. Unterpunkt: Fenster, Parameter** auf Seite 58).

Um also einen Punkt des Zahnes 31 in einem Fenster darstellen zu können, muß dieser folgende Transformationen erfahren:

Zahnkoordinaten 31 \square modellM31 \square aendM31 \square modellMUK \square aendMUK \square WC_DC \square
Fensterkoordinaten 31

2.3.2 Kommutativgesetz bei Matrixrechnung

Jeder Zahn besitzt ein eigenes Koordinatensystem, auf das sich jeder Punkt des Zahnes bezieht. Um Zähne in Beziehung zueinander setzen zu können, definiert man ein Weltkoordinatensystem (zum Beispiel Mundhöhle). Es muß nun eine Rechenvorschrift (Matrix) existieren, um jeden Punkt des Zahnkoordinatensystems in das Weltkoordinatensystem übertragen zu können. Diese wird Transformationsmatrix genannt. Transformationen lassen sich unterscheiden in Rotationen, Verschiebungen und Skalierungen. Für jeden dieser Fälle gibt es spezielle Matrizes. Skalierungen finden in diesem Programm keine Verwendung. Die einzelnen Matrizes werden multiplikativ zur Transformationsmatrix zusammengefaßt. Bei der Matrixmultiplikation gilt das Kommutativgesetz (Vertauschungsgesetz) nicht. Das bedeutet, daß die Endstellung eines Objektes nach Rotation um seine X-Achse um einen Winkel α und um seine Y-Achse um einen Winkel β eine andere ist als die Rotation um diese Achsen in umgekehrter Reihenfolge. Bei einer Kombination aus Translationen und Rotationen gilt dasselbe. Es wurde deshalb folgende Reihenfolge für die Transformationsschritte festgelegt:

1. Rotation um die X-Achse (Kippungen nach vestibulär und oral)
2. Rotation um die Y-Achse (Kippungen nach mesial und distal)
3. Rotation um die Z-Achse (rechts und links herum bei Sicht auf die Okklusalfäche)
4. Translation entlang der X-Achse (Verschiebungen nach mesial und distal)
5. Translation entlang der Y-Achse (Verschiebungen nach vestibulär und oral)

6. Translation entlang der Z-Achse (Verschiebungen nach apikal und okklusal)

Diese Transformationen werden nicht direkt auf das Weltkoordinatensystem übertragen, sondern auf das jeweilige Zahnkoordinatensystem bezogen, und erst dann auf das Weltkoordinatensystem übertragen.

Bei Rotationen eines Zahnes um einen Winkel α erhält man die Gesamttransformation (Matrix Tges), indem die Zahnrotationsachse auf den Ursprung des Weltkoordinatensystems verschoben wird (Matrix: V). Dann wird sie durch Rotationen um die Welt-X-Achse (Matrix: Rx) und um die Welt-Y-Achse (Matrix: Ry) so gedreht, daß sie kongruent mit der positiven Welt-Z-Achse wird. Hier erfolgt die eigentliche Rotation um den Winkel α (Matrix: Rz). Schließlich werden alle Rotationen und Verschiebungen bis auf Matrix: Rz rückgängig gemacht (Matrix: Ry', Matrix: Rx', Matrix: V):

$$T_{ges} = (V * R_x * R_y * R_z * R_y' * R_x' * V')$$

Hierbei ist es entscheidend, in welchem der acht Oktanten des Raumes die Rotationsachse am Anfang steht, da die Rotationen sowohl rechts als auch links herum stattfinden können.

Verschiebungen werden im Weltkoordinatensystem direkt durchgeführt, nachdem die Verschiebevektoren transformiert wurden.

2.3.3 Rückberechnung aller Stellungenänderungen aus der Anfangs- und Endposition der Objekte

Problem:

Hat man die einzelnen Zähne im Rahmen des computerisierten Setups rotiert und bewegt, will man am Ende in der Regel die jeweiligen Rotations- und Translationswerte wissen, die von der Ausgangs- zur Endstellung führen. Dieses darf nicht in Form einer einfachen Summation der durchgeführten Schritte geschehen, da sich Rundungsfehler kumulieren würden.

Lösung:

Die Stellung eines Zahnes in seinem Kiefer wird durch zwei Matrizes bestimmt (xx ist die internationale Zahnbezeichnung):

- Die Matrix „modellMxx“ für die ursprüngliche Stellung des Zahnes im Kiefer (Anfangsstellung) und
- die Matrix „aendMxx“, in der die Veränderungen von der ursprünglichen Stellung festgelegt sind (Endstellung).

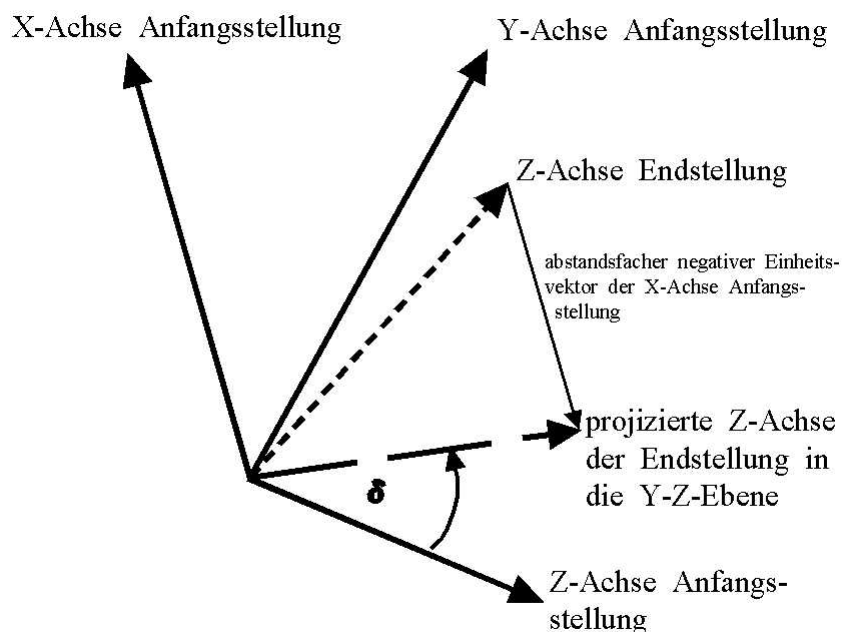
Aus dem Unterschied beider Matrizes werden die durchgeführten Rotationen und Translationen errechnet.

Zur Berechnung der Rotationen werden die Koordinatensysteme, die man durch Anwendung beider Matritzes erhält, auf den Ursprung des Weltkoordinatensystems verschoben. Rotationen sind jeweils um die X-, Y- und Z-Achse möglich. Diese Rotationen sind jedoch nicht voneinander unabhängig, das heißt, wird um eine Achse gedreht, so ändern die beiden anderen Achsen ihre Stellung.

Die Berechnung erfolgt folgendermaßen:

Es wird zunächst die Rotation um die X-Achse ermittelt. Dazu muß die Z-Achse der Endstellung auf die Y-Z-Ebene der Anfangsstellung projiziert werden. Dies geschieht, indem der Abstand des Punktes, der vom Einheitsvektor der Z-Achse der Endstellung repräsentiert wird, zur Y-Z-Ebene der Anfangsstellung errechnet wird. Dieser Wert mit dem Einheitsvektor der X-Achse in der Anfangsstellung multipliziert, wird vom Einheitsvektor der Z-Achse vektoriell subtrahiert. Das Ergebnis ist ein Punkt auf der projizierten Z-Achse der Endstellung.

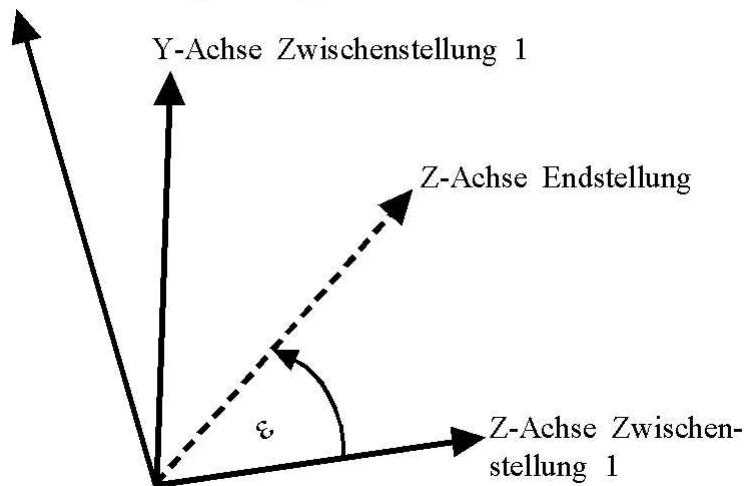
Der Winkel δ zwischen der Z-Achse der Anfangsstellung und der projizierten Z-Achse der Endstellung ist der gewünschte Rotationswinkel um die X-Achse oder für die Kippung nach vestibulär oder oral.



Diese Rotation um die X-Achse wird nun durchgeführt und man erhält die Y- und Z-Achsen der Zwischenstellung 1.

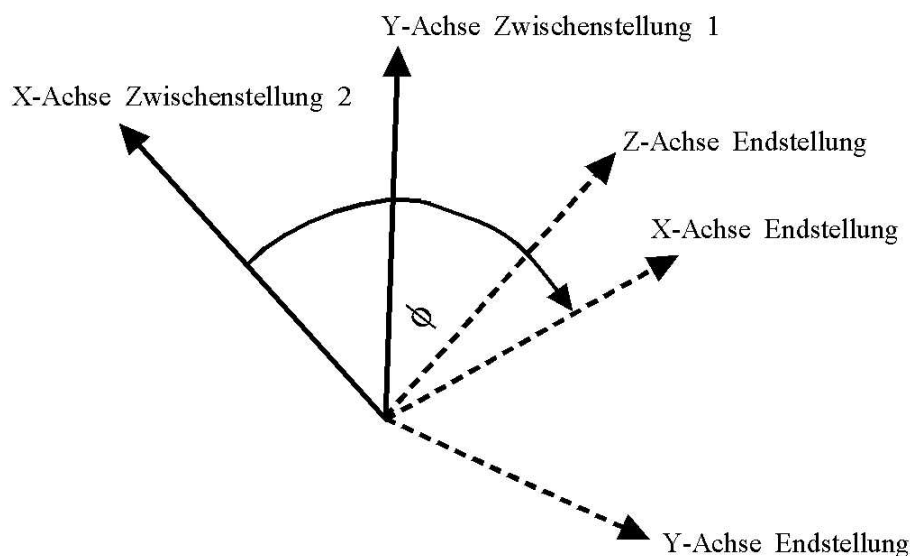
Der Winkel ϵ zwischen den Z-Achsen der Zwischenstellung 1 und der Endstellung ist der Rotationswinkel um die Y-Achse der Zwischenstellung 1 oder für die Kippung nach mesial oder distal.

X-Achse Anfangsstellung



Diese Rotation um die Y-Achse der Zwischenstellung 1 wird nun durchgeführt, und man erhält die Zwischenstellung 2. Die Z-Achsen der Zwischenstellung 2 und der Endstellung sind nun kongruent. Nicht jedoch zwingend die X- und Y-Achsen dieser Stellungen.

Der Winkel ϕ zwischen den X-Achsen der Zwischenstellung 2 und der Endstellung ist der Rotationswinkel um die Z-Achse der Zwischenstellung 2 (oder Endstellung) oder für die Rotation rechts oder links herum bei Sicht auf die Okklusionsfläche eines Zahnes.



Die vom Benutzer verursachten Translationen werden wie folgt zurückberechnet:

Es wird der Vektor berechnet, der sich vom Ursprungspunkt des Koordinatensystems des Zahnes in seiner Anfangsstellung bis zum Ursprungspunkt des Koordinatensystems in der Endstellung erstreckt. Dieser wird nun in Beziehung gesetzt zu den Richtungsvektoren des Koordinatensystems in der Endstellung, das heißt es werden entsprechend der unbekannten Anteile der Richtungsvektoren drei Gleichungen mit drei Unbekannten gebildet, die mit Hilfe der CRAMERSchen Regel gelöst werden.

2.3.4 Schnittberechnung

Da in der vorliegenden Arbeit Flächen als Dreiecksflächen definiert werden und eine Ebene durch drei Punkte festgelegt ist, stellt jede Fläche einen Teil einer Ebene dar. Überlappen sich zwei Zähne, so müssen sich Flächen der Zähne schneiden. Mathematisch bedeutet dies den Schnitt zweier Ebenen. Sind zwei Ebenen nicht gleich oder parallel, so schneiden sie sich in einer Schnittgeraden. Da die Dreiecksflächen nur einen Teil der jeweiligen Ebene ausmachen, bedarf es noch einer Prüfung, ob die Schnittgerade der Ebenen tatsächlich die Dreieckskanten schneidet. Hierbei werden die Schnittpunkte zwischen der Ebenenschnittgerade und den aus den Dreieckskanten hervorgehenden Geraden auf ihre Position zwischen den Eckpunkten geprüft (zwei Geraden einer Ebene schneiden sich in einem Punkt). Sind beide Dreiecksflächen durch die Ebenenschnittgerade geschnitten, wird noch geprüft, ob sie in demselben Bereich der Schnittgerade geschnitten wurden, denn nur dann liegt tatsächlich ein Schnitt dieser Flächen vor. Aus allen Schnittpunkten der Kanten der Schnittflächen zweier Zähne wird die Schnittebene berechnet. Die Breite jedes überlappenden Teiles (des Stripebenenquaders) ergibt sich aus dem größten Abstand der Punkte des überlappenden Teiles von der Schnittebene.

Berechnung der Schnittpunkte der Dreieckskanten mit der Ebenenschnittgerade:

Bei drei Punkten P_1 , P_2 , P_3 eines Dreiecks gibt es drei Kanten. Jede Kante wird durch eine Geradengleichung beschrieben:

$$\text{Kante1: } \vec{X} = \vec{P}_1 + m * (\vec{P}_2 - \vec{P}_1) \quad , \text{ wobei gilt: } 0 \leq m \leq 1.$$

$$\text{Kante2: } \vec{X} = \vec{P}_1 + n * (\vec{P}_3 - \vec{P}_1) \quad , \text{ wobei gilt: } 0 \leq n \leq 1.$$

$$\text{Kante3: } \vec{X} = \vec{P}_2 + o * (\vec{P}_3 - \vec{P}_2) \quad , \text{ wobei gilt: } 0 \leq o \leq 1.$$

\vec{P}_1 , \vec{P}_2 und \vec{P}_3 sind die Vektoren zu den Punkten P_1 , P_2 und P_3 .

\vec{X} ist der Vektor zu einem gesuchten Punkt.

m, n und o sind Variablen.

Die Kante3 lässt sich auch durch die Geradengleichungen von Kante1 und Kante2 beschreiben:

$$\begin{aligned} \text{Kante3: } \vec{X} &= \vec{P}_1 + m * (\vec{P}_2 - \vec{P}_1) + n * (\vec{P}_3 - \vec{P}_1) , \text{ wobei gilt: } & 0 \leq m \leq 1 , \\ & & 0 \leq n \leq 1 \text{ und} \\ & & n + m = 1 . \end{aligned}$$

Diese Gleichung stellt einen Spezialfall einer Ebenengleichung dar.

Die Gleichung der Ebenenschnittgerade ist:

$$\vec{X} = \vec{S}_1 + f * (\vec{S}_2 - \vec{S}_1)$$

\vec{S}_1 und \vec{S}_2 sind Vektoren zu Punkten der Schnittgeraden.

f ist eine Variable.

Um den Schnittpunkt der Geraden mit den Kanten zu ermitteln, werden die Gleichungen gleich gesetzt:

(Exemplarisch für die Kante1)

$$\vec{P}_1 + m * (\vec{P}_2 - \vec{P}_1) = \vec{S}_1 + f * (\vec{S}_2 - \vec{S}_1)$$

Da jeder Punkt drei Koordinaten besitzt, können drei Gleichungen für zwei Unbekannte gebildet werden. Eine Gleichung wird also nicht benötigt, um das Gleichungssystem zu lösen. Da die Geraden in einer gemeinsamen Ebene liegen müssen, dürfen sie nur nicht gleich oder parallel sein, um einen Schnittpunkt zu erhalten.

Die Lösung für die Unbekannten lautet:

$$f = (P_{1x} + m * (P_{2x} - P_{1x}) - S_{1x}) / (S_{2x} - S_{1x})$$

$$m = (S_{1y} - P_{1y} + (S_{2y} - S_{1y}) * P_{1x} / (S_{2x} - S_{1x}) - (S_{2y} - S_{1y}) * S_{1x} / (S_{2x} - S_{1x})) / ((P_{2y} - P_{1y}) - (S_{2y} - S_{1y}) * (P_{2x} - P_{1x}) / (S_{2x} - S_{1x}))$$

ist also $0 \leq m \leq 1$, so existiert ein Schnittpunkt mit der Kante.

Kongruenzüberprüfung der geschnittenen Abschnitte der Ebenenschnittgerade:

Die Ebenenschnittgerade schneidet die Dreieckskanten üblicherweise in zwei Punkten. Ausnahme: sie berührt das Dreieck tangential in einem Eckpunkt. Man erhält also zwei Paare von Schnittpunkten, die nur dann gleiche Bereiche auf der Ebenenschnittgerade markieren, wenn ein Schnittpunktpaar existiert, das mindestens einen Punkt des anderen Paares einschließt. Es wird aus jedem Schnittpunktpaar eine Geradengleichung gebildet, die auf die Punkte des anderen Punktpaares angewendet wird.

$\vec{X} = \vec{S}_1 + i * (\vec{S}_2 - \vec{S}_1)$ Geradengleichung des ersten Paares

\vec{S}_1, \vec{S}_2 erstes Paar Vektoren zu den Schnittpunkten

\vec{S}_3, \vec{S}_4 zweites Paar Vektoren zu den Schnittpunkten

i ist eine Variable.

Auf ersten Punkt des zweiten Paares angewendet:

$$\vec{S}_3 = \vec{S}_1 + i * (\vec{S}_2 - \vec{S}_1) \quad \Rightarrow$$

$$i = (\vec{S}_3 - \vec{S}_1) / (\vec{S}_2 - \vec{S}_1)$$

Ist $0 \leq i \leq 1$, so liegt der Punkt des zweiten Paares S_3 zwischen den Punkten des ersten Paares S_1 und S_2 . Trifft die Bedingung zu, so existiert ein sich überlappender Bereich auf der Ebenenschnittgerade.

Berechnung der Breite zwischen der Schnittebene und den überlappenden Teilen der Zähne:

Es wird aus der Dreipunktgleichung der Schnittebene die Hessesche Normalenform gebildet. Diese bezeichnet einen Normaleneinheitsvektor (Länge=1), der vom Nullpunkt zur Ebene zeigt und senkrecht zur Ebene steht, und den Abstand vom Nullpunkt zur Ebene in Richtung dieses Vektors.

Die Punktrichtungsgleichung der Ebene lautet:

$$\vec{X} = \vec{P}_1 + m * (\vec{P}_2 - \vec{P}_1) + n * (\vec{P}_3 - \vec{P}_1)$$

Der Normalenvektor \vec{N} der Ebene steht senkrecht auf den Richtungsvektoren. Man bildet ihn aus dem Vektorprodukt der Richtungsvektoren.

$$\vec{N} = (\vec{P}_2 - \vec{P}_1) \times (\vec{P}_3 - \vec{P}_1)$$

$$N_x = (P_{2y} - P_{1y}) * (P_{3z} - P_{1z}) - (P_{2z} - P_{1z}) * (P_{3y} - P_{1y})$$

$$N_y = - ((P_{2x} - P_{1x}) * (P_{3z} - P_{1z}) - (P_{2z} - P_{1z}) * (P_{3x} - P_{1x}))$$

$$N_z = (P_{2x} - P_{1x}) * (P_{3y} - P_{1y}) - (P_{2y} - P_{1y}) * (P_{3x} - P_{1x})$$

Der Normalenvektor \vec{N} wird zum Normaleneinheitsvektor \vec{N}_E , wenn man die Komponenten des Vektors durch die Gesamtlänge des Vektors teilt.

Die allgemeine Normalenform für eine Ebene lautet:

$$\vec{N}_E * \vec{X} - \vec{N}_E * \vec{P} = 0$$

\vec{X} ist ein gesuchter Punkt der Ebene.

\vec{P} ist ein bekannter Punkt der Ebene.

Man kann an Stelle von \vec{P} den bekannten Punkt \vec{P}_1 nehmen und erhält, wenn man definiert

$$d = \vec{N}_E * \vec{P} \quad \text{und} \quad d \geq 0,$$

die Hessesche Normalenform für die Ebene:

$$\vec{N}_E * \vec{X} - d = 0$$

Gesucht ist die Breite jedes überlappenden Teiles oder der größte Abstand der Punkte des überlappenden Teils von der Schnittebene. Abstandsberechnungen von der Schnittebene lassen sich leicht durch die Hessesche Normalenform der Ebene berechnen. Man kann zu jedem Punkt des überlappenden Teils eines Zahnes eine Parallelebene zur Schnittebene bilden, indem man nur die Abstandskonstante d neu berechnet. Da die neue Ebene parallel zur Schnittebene ist, bleibt der Normaleneinheitsvektor gleich:

\vec{P}_X Vektor zu einem beliebigen Punkt P_X des Zahnes.

$$d_X = \vec{N}_E * \vec{P}_X \quad d_X \text{ ist der Abstand der Parallelebene zum Nullpunkt.}$$

Vergleicht man die verschiedenen Abstände der Parallelebenen durch alle Punkte mit dem Abstand der Schnittebene, so erhält man aus der größten Differenz dieser Abstände die gesuchte Breite des überlappenden Stückes.

Verschiebung der Schnittebene:

Zur Verschiebung der Schnittebene addiert, beziehungsweise subtrahiert man vom bekannten Punkt der Normalengleichung der Ebene ein gewünschtes Vielfaches der Normaleneinheitsvektors.

Normalengleichung der Ebene:

$$\vec{N}_E * \vec{X} - \vec{N}_E * \vec{P}_1 = 0$$

Beispiel:

Die Ebene soll um 8 Einheiten vom Nullpunkt weggeschoben werden:

$$\vec{N}_E * \vec{X} - \vec{N}_E * (\vec{P}_1 + 8) = 0$$

2.3.5 Berechnungen bei der Artikulation

Bei der Artikulation wird im Programm „VirtSet“ ein SAM®-Artikulator simuliert. Das Kiefergelenk wird zu einem Dreh- und linearen Gleitgelenk abstrahiert. Einstellbar sind die Koordinaten für die Mittelpunkte der Kiefergelenksköpfchen, die Winkel für die rechte und linke Kiefergelenksbahnneigung, die rechten und linken BENNETT-Winkel und die Länge der Artikulationsbewegung. Für die Pro- und die Laterotrusionen wird jeweils ein Artikulationsweg gebildet. Jeder Artikulationsweg wird zur Berechnung in einzelne Schritte aufgeteilt. Bei jedem Schritt wird zuerst eine Verschiebung der Kiefergelenksköpfchen durchgeführt. Nun stimmt die Kontaktsituation zwischen Oberkiefer und Unterkiefer nicht mehr. Jeder Punkt aller Unterkieferzähne wird nun daraufhin geprüft, wo ein diesen Punkt berührender Kreisbogen, dessen Mittelpunkt auf der Rotationsachse liegt, die durch die neue Stellung der Kiefergelenksköpfchen gebildet wird, und der zu dieser Achse senkrecht steht, auf einen Oberkieferzahn trifft. Existiert am Oberkieferzahn eine Berührung durch diesen Kreisbogen, so stellt dies mathematisch den Schnitt zwischen einer Dreiecksfläche (Teilfläche eines Zahnes) und einem Kreisbogen dar:

Die Dreiecksfläche ist Teil einer Ebene. Deren Punktrichtungsgleichung ist:

$$\mathbf{I} \quad \vec{X} = \vec{A} + i * \vec{B} + j * \vec{C}$$

wobei i und j Variablen sind und

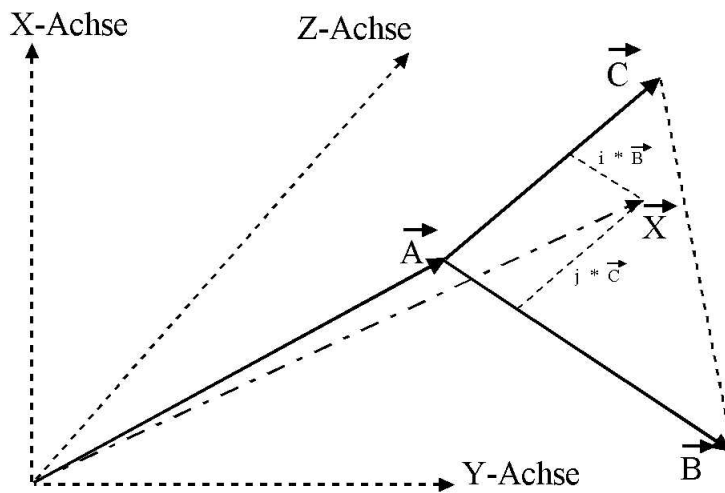
\vec{X} , \vec{A} , \vec{B} und \vec{C} Vektoren darstellen.

Ist \vec{X} ein Vektor zu einem Punkt X der Dreiecksfläche, dann gilt:

$$0 \leq i \leq 1,$$

$$0 \leq j \leq 1 \text{ und}$$

$$0 \leq i + j \leq 1.$$



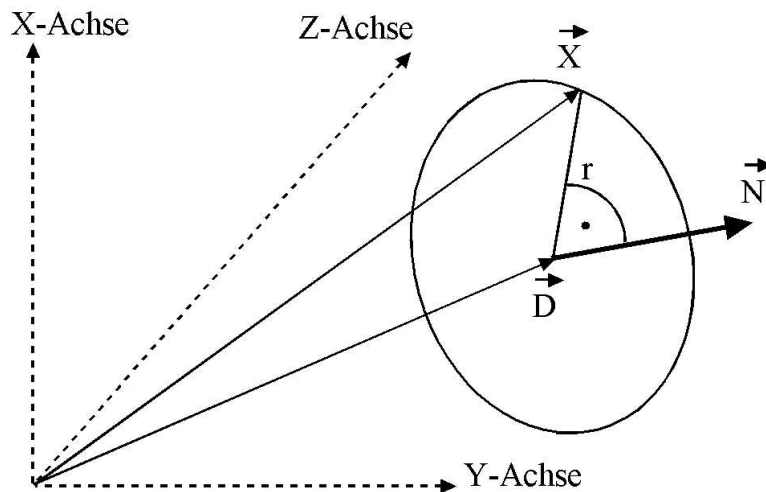
Der Kreisbogen um die Kondylenachse ist ebenfalls Teil einer Ebene, auf der die Kondylenachse senkrecht steht. Es wird die HESSEsche Normalenform für die Ebene verwendet.

\vec{X} ist der Vektor zu einem Punkt X eines Unterkieferzahn.

\vec{D} ist der Vektor zu ein Punkt D auf der Kondylenachse, der lotrecht zu X ist.

\vec{N} ist der normierte Richtungsvektor der Kondylenachse.

r ist der Radius des Kreisbogens.



$$\text{II} \quad \vec{N} * (\vec{X} - \vec{D}) = 0$$

$$\text{I in II} \Rightarrow$$

$$zwa = \vec{N} * \vec{D} - \vec{N} * \vec{A}$$

$$zwb = \vec{N} * \vec{C}$$

$$zwc = \vec{N} * \vec{B}$$

zwa, zwb, zwc sind Zwischenwerte zur Vereinfachung

$$i = (zwa - j * zwb) / zwc$$

$$\text{in I} \Rightarrow$$

$$\vec{E} = \vec{A} + zwa/zwc * \vec{B}$$

$$\vec{F} = \vec{C} - zwb/zwc * \vec{B}$$

\vec{E} und \vec{F} sind Vereinfachungsvektoren

$$\text{III} \quad \vec{X} = \vec{E} + j * \vec{F}$$

Dies ist die Geradengleichung des Ebenenschnittes.

Da der Schnittpunkt auf einem Kreisbogen liegen soll, gilt:

Der Betrag $|\vec{X} - \vec{D}|$ ist gleich dem Radius des Kreisbogens r.

$$\text{IV} \quad |\vec{X} - \vec{D}| = r$$

IV in III \Rightarrow

$$p = 2 * \vec{F} * (\vec{E} - \vec{D}) / \vec{F}^2$$

$$q = ((\vec{D} - \vec{E}) - r^2) / \vec{F}^2$$

p, q sind Glieder der quadratischen Ergänzungsformel

$$j^2 + j * p + q = 0$$

Faßt man die Gleichungen zusammen, so erhält man eine quadratische Gleichung gemischten Typs, die man einfach lösen kann. Es sind zwei, eine oder keine Lösung möglich. Die Anzahl der Lösungen richtet sich danach, ob der Kreisbogen die Dreiecksflächenebene schneidet, tangential berührt oder keinen Kontakt hat.

Für die Diskriminante D gilt:

$$D = p^2/4 - q$$

1. Fall zwei Lösungen:

Ist $D > 0$, existieren die Lösungen j1 und j2:

$$j1 = -p/2 - \sqrt{D}$$

$$j2 = -p/2 + \sqrt{D}$$

2. Fall eine Lösung:

Ist $D = 0$, dann existiert die Lösung j:

$$j = -p/2$$

3. Fall keine Lösung:

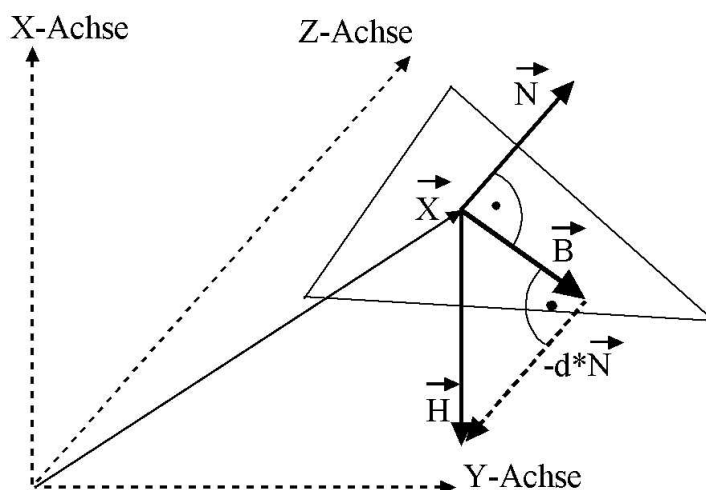
Ist $D < 0$, ist j nicht definiert.

Die berechneten Schnittpunkte werden auf Position innerhalb der Dreiecksfläche geprüft. Für alle tatsächlichen Schnittpunkte der Kreisbögen an Unterkieferpunkten mit Oberkieferdreiecksflächen werden die Winkel der Kreisbögen berechnet. Mit dem kleinsten dieser Winkel erfolgt eine Rotation um die Rotationsachse, die durch die neue Stellung der Kiefergelenksköpfchen gebildet wird. Es entsteht dadurch ein erneuten Kontakt zwischen Ober- und Unterkieferzähnen.

2.3.6 Kontaktpunktberechnung

Die Kontaktpunktsuche stellt die Veränderung der Stellung eines Zahnes bezüglich seiner approximalen Nachbarzähne und Antagonisten dar. Sie setzt sich aus Verschiebungen und Rotationen zusammen. Die Entscheidung, welche Strategie angewandt wird, richtet sich nach der Anzahl der aktuellen Kontaktpunkte:

- Bei einem Kontaktpunkt wird die Hauptbewegungsrichtung des aktiven Zahnes auf die am Kontaktpunkt \vec{X} liegende Fläche übertragen und daraus eine resultierende Bewegungsrichtung errechnet: Der Vektor \vec{H} für die Hauptbewegungsrichtung wird skalar mit dem Normalvektor \vec{N} der am Kontaktpunkt liegenden Fläche multipliziert. Das Ergebnis ist der Abstand d des Zielpunktes des Vektors \vec{H} von der Fläche. Wird nun ein d -faches des Normalvektors \vec{N} vom Vektor \vec{H} subtrahiert, erhält man den Vektor \vec{B} der neuen Bewegungsrichtung.



Der Winkel zwischen der Hauptbewegungsrichtung \vec{H} und dem resultierenden Bewegungsvektor \vec{B} soll größer als 90° sein. Ist dieser Winkel kleiner als 90° , so wird die Richtung des Bewegungsvektors \vec{B} umgekehrt. Jede der weiteren Bewegungen muß daraufhin geprüft

werden, ob sie frei ist, das heißt, ob es an anderer Stelle der geprüften Zähne zu einem weiteren Kontakt kommt. Im Rahmen dieser Bewegungsfreiheit wird nun der aktive Zahn entsprechend dem Bewegungsvektor \vec{B} verschoben, bis der Kontaktpunkt an eine Kante der Dreiecksfläche stößt. Es wird die benachbarte Teilfläche ermittelt und ein neuer Bewegungsvektor \vec{B} berechnet. Ein weiteres Verschieben erfolgt entsprechend dem oberen Verfahren, bis eine neue Kontaktsituation eintritt.

- Bei zwei Kontaktpunkten wird aus beiden an den Kontaktpunkten liegenden Flächen eine Schnittgerade berechnet, welche die weitere Bewegungsrichtung darstellt. Der Winkel zwischen der Hauptbewegungsvektor \vec{H} und der Schnittgerade soll größer als 90° sein. Ist dieser Winkel kleiner als 90° , so wird die Richtung der Schnittgerade umgekehrt.
- Bei drei Kontaktpunkten wird aus diesen eine Fläche gebildet und geprüft, ob der Hauptbewegungsvektor am Schwerpunkt des aktiven Zahnes ansetzend diese Fläche schneiden würde. Verläuft der Hauptbewegungsvektor seitlich an dieser Fläche vorbei, wird der Zahn nach dieser Seite gekippt. (Ein dreibeiniger Tisch, der mit einem Gewicht außerhalb seiner Grundfläche belastet wird, kippt in Richtung des Gewichtes.)
- Bei mehr als drei Kontaktpunkten wird die Berechnung der Kontaktpunkte beendet.

2.3.7 Berechnungen im Programmteil „Objekt erstellen“

Der Objektaufbau erfolgt über eine erste sogenannte Startkante, diese wird in der Regel durch die ersten beiden gemessenen Punkte gebildet, es sei denn, diese seien zu weit voneinander entfernt, um als benachbart bezeichnet werden zu können. Um die erste Fläche zu bilden, wird zu der Startkante ein benachbarter Punkt ermittelt. Die Verbindung dieses Punktes jeweils mit Anfangs- und Endpunkt der Startkante bildet die nächsten Kanten. Entsprechend erfolgt die Bildung der weiteren Kanten und Flächen. Damit sichergestellt werden kann, daß allen Kanten genau zwei Flächen zugeordnet werden und keine "Löcher" in der berechneten Oberfläche enthalten sind, werden während der Objektberechnung zwei Listen bearbeitet:

Offene-Kanten-Liste:

In dieser Liste sind alle Kanten enthalten, denen nur eine Fläche zugeordnet ist (Kanten müssen zwei Flächen enthalten, sonst sind "offene" Bereiche oder "Löcher" im Objekt). Sichtbar sind die

offenen Kanten im Programm „VirtSet“ als grüne Wachstumsgrenze. Nacheinander wird jeder offenen Kante ein benachbarter Punkt zugeordnet und mit diesem eine neue Fläche gebildet.

Punkt-enthält-offene-Kanten-Liste:

In dieser Liste wird zu jedem Punkt die Anzahl der "offenen" Kanten festgehalten, die ihn als Anfangs- oder Endpunkt enthalten. Der Sinn ist, einen Punkt aus dem Berechnungsverfahren herauszunehmen, sobald um ihn herum ein geschlossener Bereich von Flächen existiert.

Zu jeder offenen Kante werden die nächsten zehn Punkte ermittelt, zu denen von dem Anfangs- oder Endpunkt eine offene Kante oder noch keine Kante besteht. Existiert beispielsweise vom Anfangspunkt der offenen Kante zu einem benachbarten Punkt eine Kante, der schon zwei Flächen zugeordnet wurden, so muß dieser Punkt für die Berechnung der aktuellen Fläche ausscheiden. Aus den zehn Punkten wird der geeignetste ausgewählt. Dieser sollte möglichst mit den beiden Punkten der vorhandenen offenen Kante ein gleichschenkliges Dreieck bilden und es sollten keine anderen Punkte dazwischen liegen.

2.3.8 Schnittpunktberechnung

Im Programmteil „Objekt erstellen“ wird mit zwei Fenstern gearbeitet, in denen das zu erstellende Objekt aus unterschiedlichen Perspektiven dargestellt wird (siehe **2.4.5.1. Bedienungshinweise** auf Seite 79). Die Punktmarkierung erfolgt für jedes Fenster zweidimensional, das heißt, es sind die X- und Y-Fensterkoordinaten bekannt. Dreidimensional bezeichnen die Punktmarkierungen zwei Geraden, die senkrecht zur Bildelebene stehen und deren Z-Koordinaten variabel sind.

Der Schnittpunkt dieser zwei Geraden im Raum wird berechnet, indem man die Gleichungen der Geraden gleichsetzt. Da zwei Punkte jeder Geraden bekannt sind (bei gleichen X- und Y-Koordinaten zwei beliebige, aber verschiedene Z-Koordinaten), werden nach Transformation der Punkte von Fensterkoordinaten in Weltkoordinaten die Punktgleichungen verwendet. Nach Auflösung des Gleichungssystems lassen sich die zwei unbekannten Laufvariablen durch drei Gleichungen ermitteln, so daß man für jede Variable maximal drei Lösungen entsprechend den Raumebenen (X-Y-, X-Z- und Y-Z-Ebene) erhält, sofern die Geraden nicht parallel zu einer der Raumachsen sind. Wurden bei der Fenstereinstellung (siehe **2.4.2.5.3. Unterpunkt: Fenster, Parameter** auf Seite 58) zwei parallele Perspektiven gewählt, so liegen die Geraden parallel zueinander und es gibt keine Lösung.

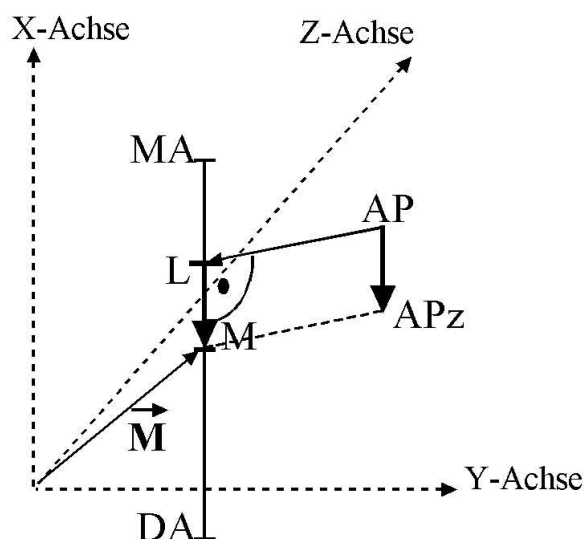
Schneiden sich die Geraden tatsächlich, so sind die Lösungen bezogen auf jede Variable identisch.

Sind die Geraden jedoch windschief, so repräsentiert jede Lösung den Schnitt der Geraden in der Projektion auf die Raumebenen. Aus den ermittelten maximal sechs Schnittpunkten wird der Mittelpunkt gebildet. Dieser liegt etwa mittig an der engsten Stelle zwischen den windschiefen Geraden.

2.3.9 Berechnung der Achsen

Zahnobjekt:

Wurde das Zahnobjekt einschließlich Wurzel und Spezialpunkten berechnet, erfolgt dessen genaue Positionierung im zahnspezifischen Koordinatensystem. Der Mittelpunkt **M** der Strecke zwischen dem mesialen Approximalpunkt **MA** und dem distalen Approximalpunkt **DA** wird zum neuen Ursprungspunkt des Zahnkoordinatensystems, das heißt die Koordinaten aller Punkte und Spezialpunkte werden entsprechend dem Vektor \vec{M} verschoben. Vom apikalen Punkt **AP** wird das Lot **L** auf diese Strecke gefällt. Der vom Punkt **L** zum neuen Ursprung **M** reichende Vektor dient zur Korrektur des apikalen Punktes. Der korrigierte apikale Punkt **APz** liegt nun auf einer Ebene durch den neuen Ursprung **M**, zu der die Strecke zwischen den approximalen Punkten, **MA** und **DA**, senkrecht steht.



Das Zahnobjekt wird im nächsten Schritt so gedreht, daß der Vektor, der vom Ursprung **M** zum korrigierten apikalen Punkt **APz** weist, kongruent zur Z-Achse wird. Dann wird das Zahnobjekt um die Z-Achse gedreht, bis der Vektor, der vom Ursprung **M** zum mesialen Approximalpunkt

MA weist, kongruent zur X-Achse wird. Damit sind die Rotationen abgeschlossen. Nun werden noch die Werte für die restlichen Standardspezialpunkte ergänzt. Der okklusale Punkt enthält einen Wert für die negative Z-Achse. Abhängig davon, in welchem Quadranten sich das Zahnobjekt befindet, werden der vestibuläre und der orale Punkt mit Werten der positiven oder negativen Y-Achse ergänzt. Im ersten und dritten Quadranten erhält der orale Punkt einen Wert auf der positiven Y-Achse, der vestibuläre Punkt entsprechend einen negativen. Im zweiten und vierten Quadranten sind die Verhältnisse umgekehrt.

Kieferobjekt:

Die Berechnung der Achsen eines Kieferobjektes erfolgt entsprechend der eines Zahnobjektes. Zur Berechnung des Koordinatensystems des Kieferobjektes werden drei Spezialpunkte verlangt, zwei zur Berechnung der X-Achse und einer zur Berechnung der Y-Achse. Der Mittelpunkt der Strecke zwischen den beiden Punkten für die X-Achse wird zum neuen Ursprungspunkt. Vom Punkt für die Y-Achse wird nun das Lot auf diese Strecke gefällt. Der vom neuen Ursprung zum sich ergebenden Punkt reichende Vektor dient zur Korrektur des Y-Achs-Punktes. Der korrigierte Y-Achs-Punkt liegt nun auf einer Ebene durch den Ursprung, zu der die Strecke zwischen den X-Achs-Punkten senkrecht steht. Das alte Koordinatensystem wird nun so gedreht, daß die Y-Achse kongruent zu dem Vektor wird, der vom Ursprung zum Y-Achs-Punkt weist. Dann wird das Koordinatensystem um die Y-Achse gedreht, bis die X-Achse kongruent zu dem Vektor wird, der vom Ursprung zum ersten X-Achspunkt weist. Die Stellung der Z-Achse ist durch die Definition eines kartesischen Koordinatensystems bekannt.

Im Fall der Frasaco®-Kiefer-Objekte wurde die Y-Achse nach vorne durch den Inzisivus-Punkt gewählt, die X-Achse verläuft etwa durch die beiden zweiten Molaren in Höhe des Zahnfleischsaumes.

2.3.10 Berechnungen bei der Zuordnung der Spezialpunkte

Da alle Punkte eines Zahnes in zahnspezifischen Koordinaten gespeichert sind, bedarf es einer Rechenvorschrift (Matrix), die es erlaubt, die zahnspezifischen Koordinaten in die Koordinaten des jeweiligen Kiefers umzurechnen. Zur Berechnung wurden bei der Einzelzahn- und der jeweiligen Kiefervermessung drei paarweise, im Rahmen der Meßungenauigkeit einander entsprechende Spezialpunkte pro Zahn ermittelt.

Dazu sind folgende Schritte notwendig:

Sofern die drei Punkte nicht auf einer Gerade liegen, bilden sie jeweils eine Ebene (Ez für den Zahn und Ek für den Kiefer).

Es werden die Ebenennormalvektoren für diese Ebenen gebildet (ENVz und ENVk). Aus diesen wird das Vektorprodukt (VPzk) berechnet. Die Rotation um diesen Vektor VPzk erlaubt es, die Ebene Ez in die Ebene Ez' zu überführen, die kongruent mit der Ebene Ek ist. Aus den drei Spezialpunkten des Zahnes (Pz1, Pz2 und Pz3) wird durch diese Rotation Pz1', Pz2' und Pz3'.

Nun erfolgt eine Verschiebung von Pz1', Pz2' und Pz3' in der Ebene Ez', so daß Pz1'' kongruent mit dem ersten Spezialpunkt Pk1 des Kiefers wird (aus Pz2' wird Pz2'' und aus Pz3' wird Pz3''). Dann wird eine Rotation der Ebene Ez' um deren Normalvektor ENVz' am Punkt Pz1'' durchgeführt, so daß der aus Pz2'' resultierende Punkt Pz2''' in derselben Richtung von Pz1'' aus liegt wie der zweite Spezialpunkt des Kiefers Pk2 (Pz3''' müßte entsprechend in etwa in derselben Richtung von Pz1'' liegen wie Pk3). Wegen der Meßungenauigkeit sind Pz2''' und Pz3''' in der Regel nicht kongruent mit Ihren entsprechenden Kieferspezialpunkten Pk2 und Pk3. Die Zusammenfassung der getätigten Veränderungen ergibt die Matrix zur Überführung des Zahnes von seinem Koordinatensystem an dessen Position im Kieferkoordinatensystem.

2.4 Bedienungsanleitung

2.4.1 Grundsätzliche Bedienungshinweise

Der Benutzer sollte in der Lage sein, die Grafikanzeige seines Computers selbständig einzustellen. Es wird eine Einstellung der Farbauflösung von 65536 Farben oder Echtfarben (True Color) empfohlen, da sonst die Ausgaben nicht sehr realistisch sind.

Der Benutzer muß mit der Bedienung der Maus in WINDOWS NT® oder WINDOWS 95® vertraut sein. Zur Interaktion mit dem Programm wird ein einfacher Tastendruck (Einfachклик genannt) auf die linke Maustaste benötigt. Mit diesem werden Menüpunkte und Unterpunkte aktiviert und Drucktasten (auf dem Bildschirm) der Werkzeuge und der Dialogfenster bedient. In den Menüfenstern „Ansicht 1 bis 3“ und „Artikulation“ wird durch einen Einfachклик auf die linke Maustaste ein Fadenkreuz an der Mausposition angezeigt. Dieses markiert den Bereich im Darstellungsfenster, der das neue Zentrum nach Verkleinerung oder Vergrößerung der Darstellung bildet. Durch einen Einfachклик auf die rechte Maustaste wird das Fadenkreuz wieder aufgehoben.

Ein Doppelклик auf die linke Maustaste führt in Dialogfenstern zu einem Selektieren der Feldinhalte.

In Dialogfenstern werden Änderungen nur wirksam, wenn die „OK“-Taste gedrückt wird. Ein Druck auf die „Abbrechen“-Taste oder auf die „Esc“-Taste (auf der Tastatur) schließt das Dialogfenster, ohne Änderungen zu übernehmen.

2.4.2 Bedienungsanleitung Hauptmenü



2.4.2.1 Menüpunkt: Datei

Unter diesem Menüpunkt finden sich Datei- und Druckoperationen sowie der Programmausgang.



2.4.2.1.1 Unterpunkt: Öffnen

Nachdem man das Programm „VirtSet“ gestartet hat, sind große Teile des Hauptmenüs nicht aktiviert. Man muß zuerst einen Patientendatensatz laden.

Es erscheint das Windows®-Datei-Öffnen-Dialogfenster, mit dessen Hilfe sich die zu öffnende Datei suchen und markieren läßt. Es ist nur möglich, eine Datei mit der Extension *.mts zu öffnen.



Die Beispieldatei heißt frasaco.mts und ist im Ordner Daten zu finden.

Wird nach erfolgter Auswahl die „OK“-Taste gedrückt, erscheint das Dialogfenster „Patient“. Hiermit kann man auf die Art der zu ladenden Zähne und Kiefer Einfluß nehmen.

Patientenname	Patientenvorname	Geburtsdatum	Erstellungsdatum
Frasaco	Detlef	10.5.1965	4.11.1998

Zahn	internat.	Status	Verf.
18	FEHLT	nicht extrahiert	nicht gestrippt
17	vorhanden	nicht extrahiert	nicht gestrippt
16	vorhanden	nicht extrahiert	nicht gestrippt
15	vorhanden	nicht extrahiert	nicht gestrippt
14	vorhanden	nicht extrahiert	nicht gestrippt
13	vorhanden	nicht extrahiert	nicht gestrippt
12	vorhanden	nicht extrahiert	nicht gestrippt
11	vorhanden	nicht extrahiert	nicht gestrippt
21	vorhanden	nicht extrahiert	nicht gestrippt
22	vorhanden	nicht extrahiert	nicht gestrippt
23	vorhanden	nicht extrahiert	nicht gestrippt
24	vorhanden	nicht extrahiert	nicht gestrippt
25	vorhanden	nicht extrahiert	nicht gestrippt
26	vorhanden	nicht extrahiert	nicht gestrippt
27	vorhanden	nicht extrahiert	nicht gestrippt
28	FEHLT	nicht extrahiert	nicht gestrippt
48	FEHLT	nicht extrahiert	nicht gestrippt

OK Abbrechen

Das Dialogfenster „Patient“ enthält den Patientennamen und -vornamen und eine Liste, in der einige Eigenschaften der zu ladenden Zähne dargestellt werden. Neben der internationalen Zahnbezeichnung steht die Information, ob überhaupt ein Datensatz für den Zahn vorhanden ist oder fehlt. Dann folgen die Informationen, ob der Zahn am Computer extrahiert wurde und ob der Datensatz eines bereits gestrippten Zahnes verwendet wird.

Ist man mit der Auswahl nicht zufrieden, kann man die entsprechende Zeile mit dem Cursor aktivieren, wobei das Dialogfenster „Patient Zahn“ erscheint.

Patient Zahn

Zahn 13

☒ Extrahiert

☐ Gestrippt

OK Abbrechen

Hiermit kann man nun die Einstellungen bezüglich Extraktion und Stripzustand ändern. Wird die Eigenschaft „Gestrippt“ gewählt, obwohl ein entsprechender Datensatz nicht existiert, wird diese Einstellung ignoriert.

Wird in den Felder „Geburtsdatum“ oder „Erstellungsdatum“ eine Änderung vorgenommen., so erscheint das Dialogfenster „Datum“, in dem die Eintragungen für den Tag, den Monat und das Jahr separat vorgenommen werden können.



The image shows a Windows-style dialog box titled "Datum". Inside the dialog, the text "Geben Sie bitte ein Datum ein" is displayed. Below this text are three input fields arranged vertically. The first field is labeled "Tag" and contains the number "10". The second field is labeled "Monat" and contains the number "5". The third field is labeled "Jahr" and contains the year "1965". At the bottom of the dialog, there are two buttons: "OK" on the left and "Abbrechen" on the right.

Wurden alle Dialoge mit „OK“ bestätigt, werden die Zahn- und Kieferdaten in den Hauptspeicher des Computers geladen. Dieser Vorgang kann einige Sekunden in Anspruch nehmen.

2.4.2.1.2 Unterpunkt: Drucke aktive Ansicht

Hier besteht die Möglichkeit, das gerade aktivierte Ansichtsfenster auf einem Farb- oder Schwarz-Weiß-Drucker auszugeben. Der Drucker kann permanent in der Windows®- Systemsteuerung oder temporär in dem sich hier öffnenden Windows®-Drucken-Dialogfenster unter „Einstellungen“ eingestellt werden.



Es können Probleme mit einigen Druckertreibern auftreten, da die Druckausgabe eines OpenGL®-Fensters besonders kompliziert ist. Erscheint ein kleines Fenster mit der Nachricht „Ausgabe nicht möglich, bitte anderen Treiber wählen“, ist es notwendig, eine andere Einstellung des Druckertreibers zu verwenden, beziehungsweise einen anderen Druckertreiber auszuwählen.

2.4.2.1.3 Unterpunkt: Drucke alle Veränderungen

Es werden hiermit alle vorgenommenen Verschiebungen und Rotationen berechnet und als Zahlenwerte auf dem aktiven Drucker ausgegeben. Für jeden Zahn wird ein Seitenvorschub ausgeführt (siehe auch **2.4.2.1.2. Unterpunkt: aktive Ansicht** auf Seite 45).

2.4.2.1.4 Unterpunkt: Ende

Mit diesem Unterpunkt kann man das Programm „VirtSet“ verlassen.

Die aktuellen Programmeinstellungen werden in der Datei VirtSet.ini gespeichert. Der aktuelle Status jedes Zahnes wird in der anfangs geöffneten Patientendatei mit der Extension *.mts gespeichert.

2.4.2.2 Menüpunkt: Ansicht

Unter diesem Menüpunkt finden sich Operationen zur Anzeige und Werkzeuge zur Manipulation der Stellung von Zähnen und Kiefer. Ferner lassen sich verschiedene Ebenen anzeigen.



2.4.2.2.1 Unterpunkte: Ausgabe 1, Ausgabe 2, Ausgabe 3

Es erscheinen die Menüfenster „Ansicht 1“, „Ansicht 2“ oder „Ansicht3“, in denen die aktivierten Zähne und Kiefer und eventuell Achsen, Bemaßungen und Ebenen dargestellt werden.



Immer, wenn eines der Ansichtfenster aktiviert wird, erscheint das Hauptmenü.

Einzelne Zähne und Kiefer werden mit Hilfe des Werkzeuges „Zahnschema“ aktiviert (siehe **2.4.2.2.2. Unterpunkt: Zahnschema** auf Seite 48).

Die Einstellungen für alle Fenster erfolgen im Menüpunkt Parameter (siehe **2.4.2.5. Menüpunkt: Parameter** auf Seite 57):

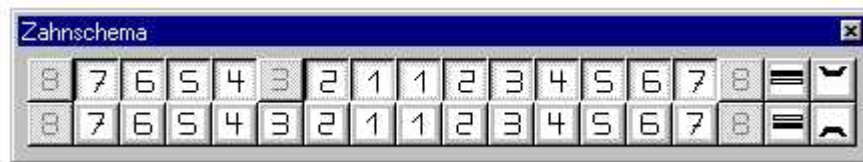
- Betrachterposition und Blickrichtung bezüglich der Kiefermodelle im Dialogfenster „Fenster, Parameter“ (siehe **2.4.2.5.3. Unterpunkt: Fenster, Parameter** auf Seite 58)
- Die Farben der Oberflächen im Dialogfenster „Material, Farben“ (siehe **2.4.2.5.4. Unterpunkt: Material, Farben** auf Seite 60)

- Die Materialeigenschaften bezüglich Reflexion und Emission im Dialogfenster „Material, Eigenschaften“ (siehe **2.4.2.5.5. Unterpunkt: Material, Eigenschaften** auf Seite 63)
- Vier verschiedene Lampen und Lampeneigenschaften im Dialogfenster „Licht“ (siehe **2.4.2.5.6. Unterpunkt: Licht** auf Seite 63)

Man kann sich durch die Ansichtfenster die ausgewählte Szene gleichzeitig von drei Aspekten ansehen.

2.4.2.2.2 Unterpunkt: Zahnschema

Es erscheint das Werkzeug „Zahnschema“.



Damit werden die Zustände der bleibenden Zähne für die Ansichtfenster angezeigt. Das Werkzeug besteht aus zwei Reihen mit Drucktasten. In der oberen Reihe befinden sich Druckknöpfe für die möglichen bleibenden Oberkieferzähne. Die Drucktasten können drei verschiedene Zustände anzeigen:

- Normal: Der Zahn wurde geladen, aber für die Ansichtfenster nicht selektiert.
- Eingedrückt: Der Zahn ist geladen und für die Ansichtfenster selektiert.
- Grau: Ein Datensatz für den Zahn ist nicht vorhanden oder der Zahn wurde extrahiert. Es ist nicht möglich, diesen Zahn für ein Ansichtfenster zu selektieren.

Rechts von den 16 Drucktasten eines Kiefers befindet sich eine Taste, mit der sich gleichzeitig alle Oberkieferzähne selektieren lassen, rechts davon eine weitere Taste zum Selektieren des gesamten Oberkiefer-Alveolarkammes.

In der zweiten Reihe befinden sich die entsprechenden Drucktasten für die Unterkieferzähne und den Unterkiefer-Alveolarkamm.

2.4.2.2.3 Unterpunkt: Rotieren

Es erscheint das Werkzeug „Rotieren“. Damit ist es möglich, den gerade aktivierten Zahn entsprechend seiner Achsen zu rotieren. Die Aktivierung eines Zahnes erfolgt durch das Werkzeug „Aktiver Zahn“ (siehe 2.4.2.3.1. **Unterpunkt: Aktiver Zahn** auf Seite 54).



Das Werkzeug „Rotieren“ enthält sechs Drucktasten in zwei Reihen. In der ersten Reihe befinden sich die Drucktasten für die Rotation nach vestibulär, für die Rotation nach mesial und für die Rotation um die Längsachse der Zahnes bei Blick auf die Okklusionsfläche entgegen dem Uhrzeigersinn oder „links herum“.

In der zweiten Reihe befinden sich die Drucktasten für die Rotation nach lingual, distal und rechts um die Längsachse (jeweils von links nach rechts).

Die Lage der Rotationsachsen entspricht den Achsen eines kartesischen Koordinatensystems. Sie lassen sich durch den **Menüpunkt: Ansicht - Unterpunkt: Achsen** (siehe 2.4.2.2.9. auf Seite 53) anzeigen.

Der eingestellte Rotationswinkel wird im Werkzeug „Aktiver Zahn“ in Grad angezeigt und kann dort ganzzahlig verändert werden (siehe 2.4.2.3.1. auf Seite 54).

Mit Hilfe der Option „Bemaßung“ im **Menüpunkt: Zahn - Unterpunkt: Bemaßung** läßt sich der gewünschte Rotationswinkel ablesen (siehe 2.4.2.3.5. auf Seite 56).

Nachdem eine Rotation (oder Verschiebung) ausgeführt wurde, wird sofort geprüft, ob es zu einem Überlappen mit den Antagonisten oder den benachbarten Zähnen des aktiven Zahnes gekommen ist. Ist dies der Fall, so werden die überlappenden Flächen graphisch markiert.

2.4.2.2.4 Unterpunkt: Verschieben

Es erscheint das Werkzeug „Verschieben“. Damit ist es möglich, den gerade aktivierten Zahn entlang seiner Achsen zu verschieben.



Das Werkzeug enthält sechs Drucktasten in zwei Reihen. In der ersten Reihe befinden sich die Tasten für eine Verschiebung nach mesial, vestibulär und apikal. In der zweiten Reihe liegen die Tasten für eine Verschiebung nach distal, oral und okklusal (jeweils von links nach rechts).

2.4.2.2.5 Unterpunkt: Kontakt

Es erscheint das Werkzeug „Kontakt“. Dieses ermöglicht die Kontaktsuche des aktiven Zahnes zu den Antagonisten oder benachbarten Zähnen.



Die erste Drucktaste erlaubt eine einfache Kontaktsuche zum Antagonisten. Der aktive Zahn wird entsprechend den Berechnungen verschoben oder rotiert (siehe **2.3.6. Kontaktpunktberechnung** auf Seite 37).

Es erscheinen, während die Stellung berechnet wird, abwechselnd zwei Fortschritts-Anzeigen. Die erste zeigt die Suche nach dem geringsten Abstand an,



die zweite die Suche nach den momentanen Kontaktpunkten.



Die Berechnung wird so lange fortgesetzt, bis mindestens vier Kontaktpunkte gefunden wurden. Der Benutzer hat jedoch die Möglichkeit, durch Druck auf die „Abbrechen“-Taste diesen Vorgang zu beenden. Es wird die Stellung, die beim Abbruch berechnet wurde, beibehalten.

Die zweite Drucktaste (von links nach rechts) erlaubt eine Okklusionsfindung unter Beibehaltung eines mesioapproximalen Kontaktpunktes. Besteht zu Beginn der Berechnung noch kein mesialer

Kontaktpunkt, so wird zuerst solch einer berechnet und der aktive Zahn entsprechend erst nach mesial, dann nach okklusal verschoben. Die Wurzelstellung der benachbarten Zähne kann ein Hindernis für die Berechnung eines approximaler Kontaktpunkt sein. Das Programm ermittelt dann einen Kontaktpunkt im Bereich der Zahnwurzeln, der an Stelle des koronalen Approximalkontaktes zu Berechnung herangezogen wird.

Die dritte Drucktaste dient zur Okklusionssuche unter Beibehaltung eines distoapproximalen Kontaktpunktes.

Die vierte Drucktaste verschiebt den aktiven Zahn entlang seiner mesiodistalen Achse bis zu einem Kontaktpunkt mit seinem mesialen Nachbarzahn.

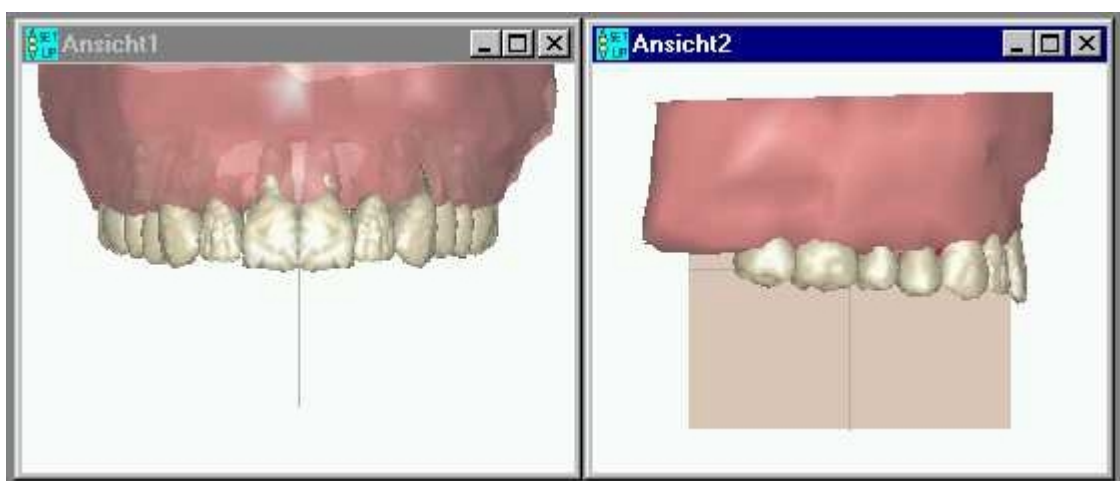
Die fünfte Drucktaste verschiebt den aktiven Zahn entsprechend zum distalen Nachbarzahn.

Wurden Zähne extrahiert, werden die an deren Stelle zu findenden Zähne geprüft. Sind keine Zähne in der angegebenen Richtung mehr zu finden, zum Beispiel distal von Zahn 17 bei extrahiertem Zahn 18, wird der Befehl ignoriert.

2.4.2.2.6 Untermenü: Hauptebenen

2.4.2.2.6.1 Unterpunkt: Sagittalebene

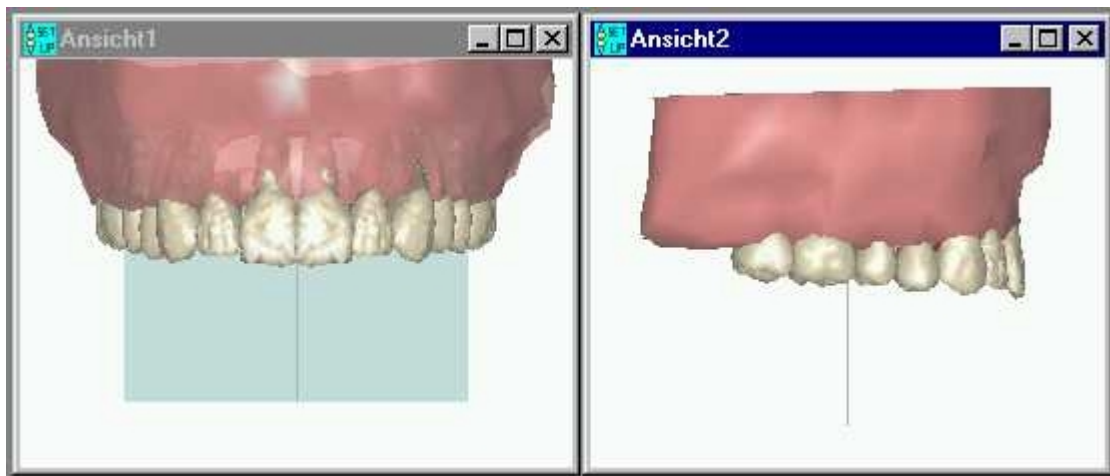
Hiermit wird die Mediansagittalebene angezeigt. Die Farbe läßt sich mit dem Dialogfenster „Ebenen, Farben“ (siehe **2.4.2.5.7. Unterpunkt: Ebenen, Farben** auf Seite 64). Die Mediansagittalebene stellt die Y-Z-Ebene für die Koordinaten der Zähne und Kiefer dar. Die positiven X-Werte befinden sich vom Patienten aus betrachtet in der rechten Hemisphäre der Ebene.



2.4.2.2.6.2 Unterpunkt: Frontalebene

Es wird die Frontalebene angezeigt.

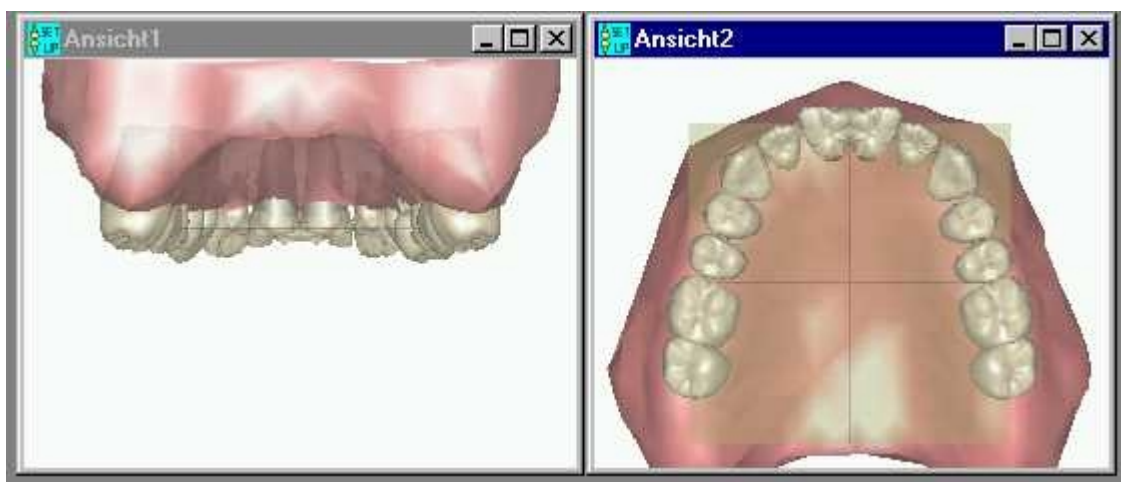
Die Frontalebene ist parallel zur X-Y-Ebene. Die positiven Z-Werte liegen vom Patienten aus betrachtet vor der X-Y-Ebene.



2.4.2.2.6.3 Unterpunkt: Horizontalebene

Es wird die Horizontalebene angezeigt.

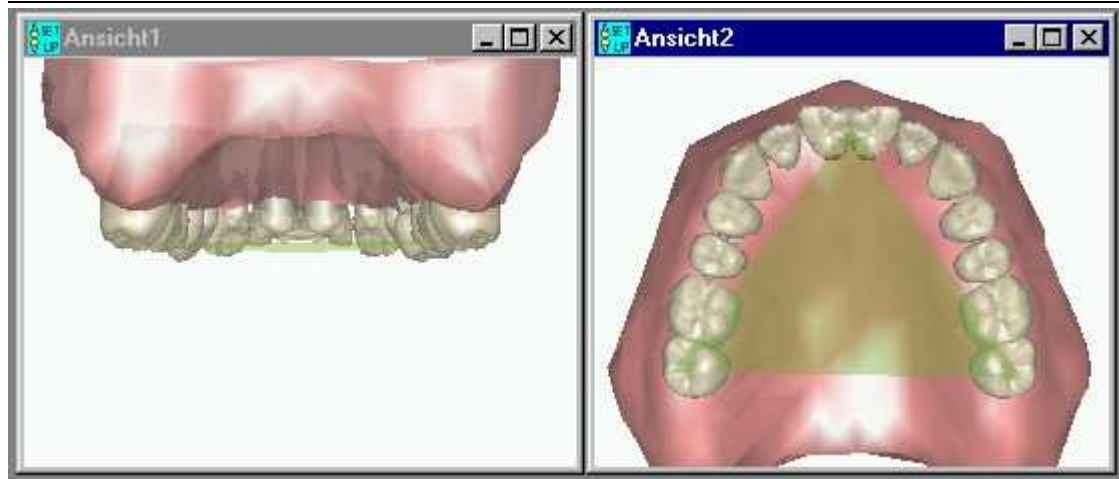
Die Horizontalebene ist parallel zur X-Z-Ebene. Die positiven Y-Werte liegen vom Patienten aus betrachtet unterhalb der X-Z-Ebene.



2.4.2.2.7 Unterpunkt: Kauebene

Es wird die Kauebene angezeigt. Diese wird gebildet durch die disto-bukkalen Höckerspitzen der Zähne 37 und 47 und dem gedachten Berührungspunkt der Verlängerung der Schneidekanten der beiden mittleren Unterkieferinzisivi.

Die Einstellung der Koordinaten für die Kauebene erfolgt im Dialogfenster „Kaubenen Parameter“ (siehe **2.4.2.5.8. Unterpunkt: Kauebene, Parameter** auf Seite 64).



2.4.2.2.8 Unterpunkt: Originalposition dazu

Hiermit werden die Zähne zusätzlich zu ihrer Setup-Position in ihrer ursprünglichen Stellung angezeigt, um die Veränderungen graphisch sichtbar zu machen.

Die Farben und die Transparenz werden im Dialogfenster „Material, Farben“ eingestellt (siehe **2.4.2.5.4. Unterpunkt: Material, Farben** auf Seite 60).

2.4.2.2.9 Unterpunkt: Achsen

Es werden die Achsen der Zähne angezeigt. Die Achsen eines Zahns stellen ein kartesisches Koordinatensystem dar. Sie bilden die entsprechenden Rotationsachsen und gemäß ihrer Lage erfolgen die Verschiebungen. Die Achsen werden beim „Objekt erstellen“ festgelegt (siehe **2.4.5..5.5. Unterpunkt: Zahn Achszuordnung** auf Seite 87).

2.4.2.2.10 Unterpunkt: Oberkiefer

Es wird das Alveolarkammmodell für den Oberkiefer angezeigt.

Dieser Menüpunkt ist identisch mit der Funktion der am weitesten rechts und oben liegenden Taste im Werkzeug „Zahnschema“ (siehe **2.4.2.2.2.** auf Seite 48).

2.4.2.2.11 Unterpunkt: Unterkiefer

Es wird das Alveolarkammmodell für den Unterkiefer angezeigt.

Dieser Menüpunkt ist identisch mit der Funktion der am weitesten rechts und unten liegenden Taste im Werkzeug „Zahnschema“ (siehe **2.4.2.2.2.** auf Seite 48).

2.4.2.3 Menüpunkt: Zahn



2.4.2.3.1 Unterpunkt: Aktiver Zahn

Es erscheint am unteren Rand des Programmfensters eine Dialogleiste.



Diese beinhaltet drei Bereiche:

- Den aktiven Zahn. Dieser wird aus den selektierten Zähnen des Werkzeuges „Zahnschema“ ausgewählt. Ist bislang kein Zahn selektiert, oder noch kein Datensatz geladen, bleibt der Wert des aktiven Zahnes bei Null stehen. Die Drucktasten mit den Pfeilen dienen jeweils zum auf- und absteigenden Ändern der Zahnbezeichnung.



- Den Wert, um den mit dem Werkzeug „Verschieben“ verschoben wird. Die Angabe erfolgt in Mikrometern. Die Drucktasten mit den Pfeilen dienen jeweils zum auf- und absteigenden Ändern des Wertes in Schritten von 50 µm.



- Den Wert, um den mit dem Werkzeug „Rotieren“ rotiert wird. Die Angabe erfolgt in Grad. Die Drucktasten mit den Pfeilen dienen jeweils zum auf- und absteigenden Ändern des ganzzahligen Wertes.



Bei Aktivierung der Wertefelder mit dem Mauszeiger erscheint ein Dialogfenster, in das man direkt den gewünschten Wert eingeben kann. Damit kann man sich ein allzu häufiges Drücken der Pfeiltasten ersparen.

Die Werkzeuge „Rotieren“, „Verschieben“ und „Kontakt“ arbeiten erst, wenn mit Hilfe der Dialogleiste „Aktiver Zahn“ ein selektierter Zahn aktiviert wurde.

2.4.2.3.2 Unterpunkt: Extrahieren

Es erscheint das Dialogfenster „Objektauswahl“:

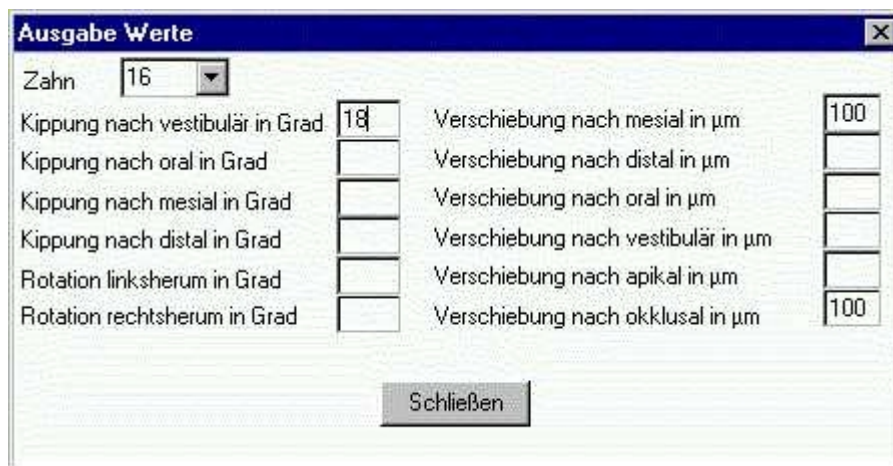


Dieses wird im Programm immer verwendet, wenn eine Zahneingabe erforderlich ist.

Aus einer Liste kann nun jeweils ein Zahn ausgesucht werden, der als extrahiert markiert wird. Daraufhin steht er für eine Berechnung im Programm nicht mehr zur Verfügung, es sei denn, die Extraktion würde wieder aufgehoben (siehe **2.4.2.6. Unterpunkt: Extraktion** auf Seite 66).

2.4.2.3.3 Unterpunkt: Veränderung Ausgabe

Für den aktiven Zahn werden die Veränderungen bezüglich Verschieben und Rotieren berechnet und in dem Dialogfenster „Ausgabe Werte“ ausgegeben.



Es handelt sich bei dieser Ausgabe um eine Neuberechnung und nicht um eine Summation der getätigten Bewegungen und Rotationen von der ursprünglichen Zahn- oder Kieferstellung ausgehend (siehe **2.3.3. Rückberechnung aller Stellungsänderungen aus der Anfangs- und Endposition der Objekte** auf Seite 27).

Mit der Drucktaste mit dem schwarzen Pfeil nach unten im Listenfeld „Zahn“ läßt sich ein anderer Zahn für die Berechnung der Veränderungen auswählen. Diese Auswahl ist unabhängig von der erfolgten Selektion der Zähne durch das Werkzeug „Zahnschema“.

Man hat im **Menüpunkt: Datei - Unterpunkt: Drucke alle Veränderungen** die Möglichkeit, diese Veränderungen auszudrucken (siehe **2.4.2.1.3.** auf Seite 46).

2.4.2.3.4 Unterpunkt: Prüfe Überschneidungen

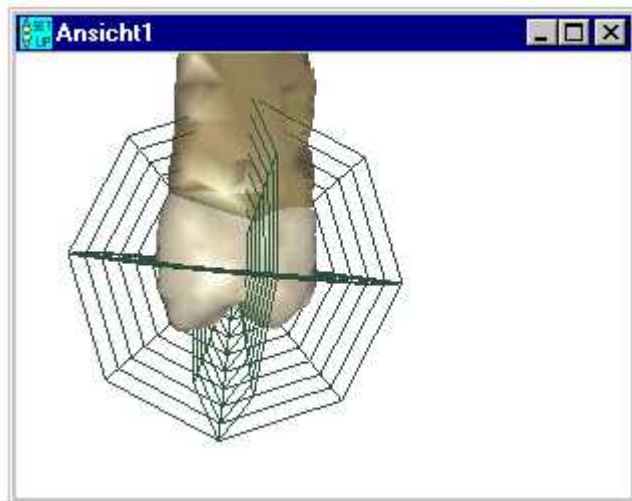
Es wird der aktive Zahn auf Überschneidungen (oder Überlappungen) mit seinen möglichen Antagonisten und seinen mesial und distal gelegenen Nachbarzähnen getestet. Die Flächen, für die ein Überlappen festgestellt wurde, werden mit der Farbe für Überschneidungsflächen am Bildschirm angezeigt. Diese läßt sich im Dialogfenster „Material, Farben“ ändern (siehe **2.4.2.5.4. Unterpunkt: Material, Farben** auf Seite 60).

Es werden ebenfalls alle Wurzelflächen darauf überprüft, ob sie außerhalb ihres Kieferkammes liegen. Trifft dies zu, werden die Flächen mit der Farbe für „Wurzel außerhalb des Kieferkammes“ gefüllt.

Sollen Zähne gestrippt werden, so stellt man sie mit Hilfe der Werkzeuge so auf, daß eine Überschneidung entsteht, und bearbeitet diese mit dem Menüfenster „Strippen“, das im **Menüpunkt: Extras - Unterpunkt: Strippen** zu aktivieren ist (siehe **2.4.2.4.** auf Seite 57 und **2.4.4. Bedienungsanleitung Programmteil „Strippen“** auf Seite 72).

2.4.2.3.5 Unterpunkt: Bemaßung

Es werden mit dem aktiven Zahn drei segmentierte Scheiben angezeigt, die in den durch die Zahnachsen gebildeten Ebenen liegen. Die Mittelpunkte der Scheiben liegen im Ursprung des Zahnkoordinatensystems. Sie zeigen die Orientierung für die Rotation und Verschiebungen und bemaßen den Zahn in den im Dialogfenster „Bemaßung“ eingestellten Einheiten (siehe **2.4.2.5.9. Unterpunkt: Bemaßung** auf Seite 65). Die Farbe ist dieselbe wie für die Achsen und läßt sich im Dialogfenster „Material, Farben“ in der Materialliste unter „Achsen“ einstellen (siehe **2.4.2.5.4. Unterpunkt: Material, Farben** auf Seite 60). Diese Bemaßungsscheiben sollen dem Anwender die Möglichkeit geben, die Werte für Verschiebungen und Rotationen besser abschätzen zu können.



2.4.2.4 Menüpunkt: Extras

Durch die hier liegenden Unterpunkte **Artikulation**, **Strippen** und **Objekt erstellen** werden neue Menüfenster geöffnet. Das sind Fenster, die bei Aktivierung ihre eigene Menüleiste anzeigen, bei Minimierung ihr eigenes Symbol besitzen, eventuell eine differenzierte Mauszeigerbedienung haben und bei der Darstellung der Zähne und Kiefer im Vergleich zu den Ansichtsfenstern Unterschiede zeigen (siehe auch die jeweilige Menübeschreibung: **2.4.3. ff Artikulation** auf Seite 68, **2.4.4. ff Strippen** auf Seite 72 und **2.4.5. ff Objekt erstellen** auf Seite 79).



2.4.2.5 Menüpunkt: Parameter

Dieser Menüpunkt dient zur Einstellung verschiedener Parameter wie Darstellung, Farben, Licht, Ebenen.



2.4.2.5.1 Unterpunkt: Ausschnitt verkleinern

Dieser Punkt bezieht sich auf das aktuelle Ansichtsfenster, und ist nur aktiv, wenn in diesem durch Betätigen der linken Maustaste ein Punkt markiert wurde. In diesem Fall erscheint ein Fadenkreuz, das teilweise auch hinter dem dargestellten Objekt liegen kann. Man markiert damit unter Beibehaltung der Blickrichtung die neue Position des Betrachterstandpunktes (normalized reference point: NRP) und des betrachteten Objektes (view reference point: VRP). Der betrachtete Sichtwürfel (Viewing volume), der in das Ansichtsfenster übertragen wird, wird um den Faktor $3/2$ vergrößert. Dies wirkt sich als Verkleinerung (zoom out) der betrachteten Objekte im Ansichtsfenster aus (siehe **2.4.2.5.3. Unterpunkt: Fenster, Parameter** auf Seite 58).

2.4.2.5.2 Unterpunkt: Ausschnitt vergrößern

Dieser Punkt entspricht dem vorhergehenden. Der Sichtwürfel wird jedoch um den Faktor $2/3$ verkleinert, was sich als Vergrößerung (zoom in) der betrachteten Objekte im Ansichtsfenster auswirkt (siehe **2.4.2.5.3. Unterpunkt: Fenster, Parameter** auf Seite 58).

2.4.2.5.3 Unterpunkt: Fenster, Parameter

Es wird das Dialogfenster „Fenster, Parameter“ geöffnet, in dem für alle geöffneten Menüfenster die Sicht auf die darzustellenden Objekte eingestellt werden kann.

Parameter	Einheit	Wert
betrachteter Objektpunkt, x	in µm	0
betrachteter Objektpunkt, y	in µm	20000
betrachteter Objektpunkt, z	in µm	0
Betrachterstandpunkt, x	in µm	0
Betrachterstandpunkt, y	in µm	20000
Betrachterstandpunkt, z	in µm	10000
oberer Sichtpunkt, x	in µm	0
oberer Sichtpunkt, y	in µm	-1
oberer Sichtpunkt, z	in µm	0
Sicht Würfel x Minimum	in µm	-40000
Sicht Würfel x Maximum	in µm	40000
Sicht Würfel y Minimum	in µm	-28368
Sicht Würfel y Maximum	in µm	28368
Sicht Würfel Tiefe z Minimum	in µm	-40000
Sicht Würfel Tiefe z Maximum	in µm	40000

Buttons: Standardwerte, Abbrechen, OK, Als Standard speichern

Mit dem Feld „Fenster“ wird das Menüfenster ausgewählt, dessen Werte geändert werden sollen. Es werden in der Liste nur die Fenster angezeigt, die schon geöffnet wurden. Mit dem Feld „Einstellung“ wird eine Liste von verschiedenen Einstellungen angezeigt (Benutzer definiert 1, Benutzer definiert 2, vorne, hinten, rechts, links, oben Oberkiefer, oben Unterkiefer), die dazu dienen, schnell eine Objekt von einer anderen Seite zu betrachten. Wird ein Feld dieser Auswahl mit der Maus aktiviert, so werden dessen aktuelle Werte in den unteren Feldern angezeigt.

Die Werte für den „betrachteten Objektpunkt x, y, z“ (auch normalized reference point oder NRP genannt) sind die Weltkoordinaten des Punktes auf dem Objekt, in dessen Richtung der Betrachter blickt. Dieser Punkt des Objekts erscheint auf dem Bildschirm im Zentrum des Menüfensters.

Die Werte für den „Betrachterstandpunkt x, y, z“ (auch view reference point oder VRP genannt) stellen die Weltkoordinaten des virtuellen Betrachterstandpunktes dar.

Die Werte für den „oberen Sichtpunkt“ (auch view up point oder VUP genannt) stellen die Weltkoordinaten eines Punktes dar, den der Betrachter sieht, wenn er nach oben blickt. Die exakte Positionierung ist bei diesem Punkt nicht wichtig, da er auf eine Ebene projiziert wird, die

senkrecht zu dem zwischen NRP und VRP liegenden Vektor ist und den Punkt NRP beinhaltet. Aus VRP und NRP wird die Z-Achse des Sicht-Würfels (auch clipping volume genannt) gebildet. Dies ist der Bereich, der in den Menüfenstern angezeigt wird. Aus dem projizierten VUP werden die X- und die Y-Achsen dieses Würfels berechnet. Die Größe des Würfels bestimmt sich aus den einstellbaren Werten des Sichtwürfels „X-Minimum“, „X-Maximum“, „Y-Minimum“, „Y-Maximum“, „Tiefe Z-Minimum“ und „Tiefe Z-Maximum“. Die Werte für „Y-Maximum“ und „Y-Minimum“ werden allerdings aus dem Verhältnis der Menüfensterbreite zur -höhe berechnet, da es sonst zu einer nicht maßstabsgetreuen Verzerrung bei der Darstellung käme.

Die Drucktaste „Standardwerte“ ersetzt die vorhandenen Werte des ausgewählten Menüfensters durch gespeicherte Standardwerte. Dies ist nützlich, falls man durch eine Fehleingabe die Orientierung im Weltkoordinatensystem verloren hat und damit eventuell keine Darstellung von Objekten mehr in dem jeweiligen Menüfenster erhält.

Die Drucktaste „Als Standard speichern“ erlaubt die Speicherung der aktuellen eines Menüfenster als Standardwerte. Wird später also die Taste „Standardwerte“ gedrückt, so erscheinen diese Werte.

Bei Druck auf die „OK“-Taste wird das Dialogfenster geschlossen und die Objekte im ausgewählten Menüfenster werden in der gewählten Darstellung neu gezeichnet.

2.4.2.5.4 Unterpunkt: Material, Farben

Es erscheint das Dialogfenster „Material, Farben“, mit dessen Hilfe für jedes Menüfenster separat die Farben für die unterschiedlichen Flächenarten eingestellt werden können.

Mit der Drucktaste „Fenster“ kann man das Menüfenster auswählen, für das die Farben eingestellt werden sollen.

Bei Druck auf die Drucktaste „Material“ erscheint eine Liste mit verschiedenen Flächenarten.

Jedes Flächenelement eines Objektes kann eine Auswahl an diesen Flächenarten besitzen.

Die Flächenarten „Schmelz“, „Wurzel“ und „Alveolarkamm“ werden bei der Objekterstellung zugeordnet und können nicht verändert werden. Sie erscheinen nicht gleichzeitig für eine Fläche.

Die Flächenarten „Okklusion“, „Protrusion“, „Laterotrusion rechts“ und „Laterotrusion links“ werden bei der Artikulation zugeordnet und können unter dem **Menüpunkt: Rückgängig** (siehe

2.4.2.6. auf Seite 66) geändert werden. Sie stellen die antagonistischen Kontaktpunkte dar, die man im Munde eines Patienten mit einem Artikulationspapier erhalten würde.

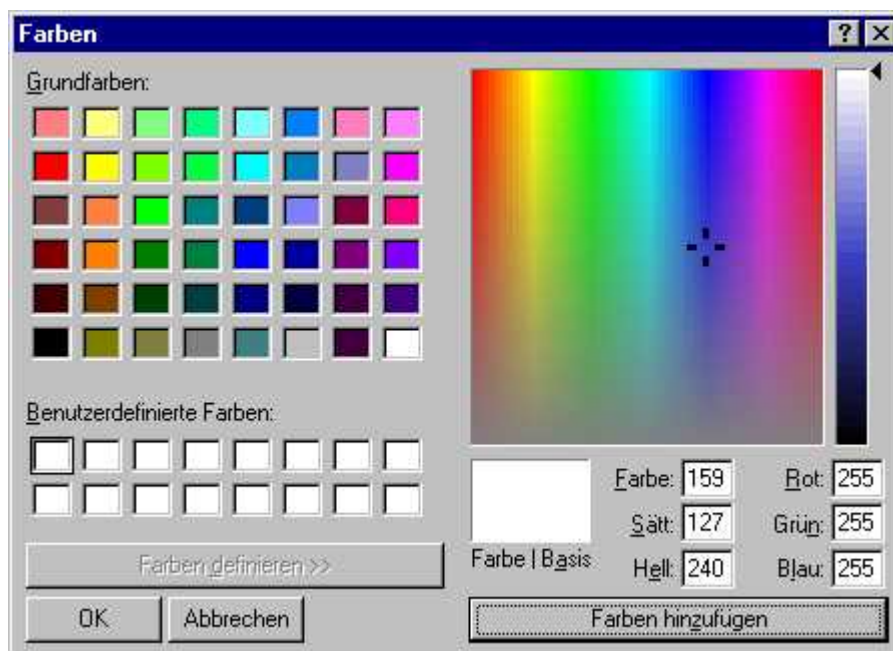
Die Flächenarten „Überschneidung“ und „Wurzel außerhalb des Alveolarkammes“ werden bei der Überschneidungsprüfung nach Rotation, Kontaktsuche und Verschieben oder durch Aktivierung des **Menüpunkt: Zahn - Unterpunkt: Prüfe Überschneidungen** (siehe **2.4.2.3.4.** auf Seite 56) zugeordnet. Sie stellen Zahnanteile, die sich mit anderen Zähnen überschneiden, oder Wurzelbereiche, die außerhalb des Kieferkammes liegen, separat dar.

Der Listeneintrag „Achsen“ repräsentiert keine Flächenart. Mit ihr läßt sich die Farbe der Achsen und der Bemaßungskreise einstellen.

Die drei Werte neben dem Feld „Farbe des Materials“ stellen die RGB-Anteile (Rot, Gelb, Blau) der ausgewählten Farbe dar. Die Werte reichen von 0 (geringster Anteil) bis 255 (höchster Anteil).

In das Feld Transparenz läßt sich eingeben, wie transparent die Darstellung der Flächenart sein soll. Es werden Werte zwischen 0 (höchste Transparenz) und 255 (höchste Opazität) erwartet.

Bei Druck auf die Drucktaste „Farbe“ erscheint das Windows®-Dialogfenster zur Farbanpassung:



Zur Benutzung dieses Dialogfensters vergleiche die Programmbeschreibung zu Windows®.

2.4.2.5.5 Unterpunkt: Material, Eigenschaften

Es erscheint das Dialogfenster „Material Eigenschaften“:

	Rot	Gelb	Blau
Ambient	0.4	0.4	0.4
Diffus	1	1	1
Spekular	1	1	1
Emission	0.2	0.2	0.2
Schimmer	50		

OK Abbrechen

Mit diesem lassen sich die Reflexionseigenschaften aller Materialien an den ambienten, diffusen und spekularen Anteilen des empfangenen Lichtes einstellen. Dabei lassen sich jeweils die Rot-, Gelb- und Blau- Anteile (RGB) einstellen.

Emission bedeutet, daß das Material Licht abgibt.

Das Feld „Schimmer“ stellt dar, wie sehr das Material als Spiegel wirkt. Es werden Werte zwischen 0 (starke spiegelnde Wirkung) und 128 (keine spiegelnde Wirkung) erwartet.

2.4.2.5.6 Unterpunkt: Licht

Es lassen sich vier verschiedene Lampen in ihren Beleuchtungseigenschaften einstellen:

Lampen: Lampe1 ☒ Eingeschaltet

Position: 0 0 1 0 Homogene Koordinaten

Diffus: 0.5 -1 bis 1

Ambient: 0 -1 bis 1

Spekular: 0.5 -1 bis 1

OK

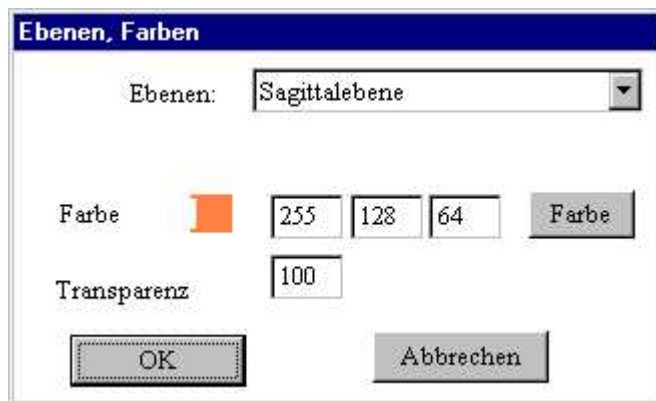
Mit dem Feld „Lampen“ läßt sich eine der vier Lampen auswählen. Daneben liegt ein Knopf zum Ein- und Ausschalten der aktuellen Lampe.

Im Feld „Position“ läßt sich die Lampenposition in homogenen Geräte- (Device-) Koordinaten eingeben. Der vierte Wert sagt aus, ob die Lampe an einem festen Punkt liegt (er sollte dann den Wert 1 haben) oder ob sie aus der Richtung dieses Punktes scheint, jedoch im Unendlichen liegt (dann ist der Wert 0 einzutragen).

Die Felder „Diffus“, „Ambient“ und „Spekular“ beziehen sich auf die gleichnamigen Lichtarten. Die Einstellungen erfolgen in Kommazahlen zwischen -1 und 1.

2.4.2.5.7 Unterpunkt: Ebenen, Farben

Das Dialogfenster „Ebenen Farben“ dient dazu, den in den verschiedenen Programmteilen darstellbaren Ebenen Farben zuzuordnen:



Mit dem Feld „Ebenen“ lassen sich die Ebenen „Sagittalebene“, „Horizontalebene“, „Vertikalebene“, „Kauebene“, „Stripebene 1“ und „Stripebene 2“ auswählen.

Zur Bedeutung der anderen Felder siehe **2.4.2.5.4. Unterpunkt: Material, Farben** auf Seite 60.

2.4.2.5.8 Unterpunkt: Kauebene, Parameter

Es erscheint das Dialogfenster „Kauebene, Parameter“. Die Kauebene spannt sich normalerweise auf vom Mittelpunkt der Verlängerung der Schneidekanten der mittleren unteren Inzisivi bis zu den disto-bukkalen Höckerspitzen der Zähne 37 und 47.

Zur Definition dieser Punkte müssen drei sogenannte Spezialpunkte vermessen werden. Diese lassen sich hier abrufen und bei Bedarf ändern:

	Zahn1	Zahn2	Zahn3
Spezialpunktnummer	41	37	47
Spezialpunktname	INZM1	OCCDB	OCCDB
Koordinaten in µm			
x	-117	-26791	27680
y	18682	17183	16767
z	39417	122	1084

OK Abbrechen

Bevor die Eingabefelder eine Eingabe akzeptieren, muß deren Inhalt durch einen Doppelklick auf die linke Maustaste selektiert werden. In der oberen Zeile lassen sich für drei Zähne die internationalen Zahnbezeichnungen eingeben. In der darunter liegenden Zeile wird die jeweilige Spezialpunktnummer eingegeben.

Darunter erscheinen daraufhin der Name des Spezialpunktes und die dazugehörigen Koordinaten in Mikrometer.

2.4.2.5.9 Unterpunkt: Bemaßung

In diesem Dialogfenster werden die Parameter für die Bemaßung (siehe **2.4.2.3.5. Unterpunkt: Bemaßung** auf Seite 56) eingestellt.

Scheibensegmente 8

Radius in µm 10000

Innenscheiben 10

OK Abbrechen

Im Feld „Scheibensegmente“ wird die Anzahl der „Tortenstücke“ für jede Ebenenscheibe eingegeben.

Das Feld „Radius“ gibt den Radius jeder Ebenenscheibe in Mikrometer an.

In das Feld „Innenscheiben“ wird die Anzahl der Innenscheiben eingegeben. Ist zum Beispiel der Radius wie oben 10000 µm und die Anzahl der Innenscheiben zehn, so hat man eine Unterteilung der Ebenenscheiben von je einem Millimeter.

Eine Einstellung von acht Scheibensegmenten bedeutet einen Winkel von 45 Grad für jedes Segment: $360 \text{ Grad für einen Vollkreis} / 8 \text{ Segmente} = 45 \text{ Grad / Segment}$.

2.4.2.5.10 Unterpunkt: Abstandswerte

Es erscheint das Dialogfenster „Abstandswerte“, dessen Einstellungen Rechenungenauigkeiten kompensieren sollen. Da die internen Berechnungen in Fließkommazahlen erfolgen, die Koordinatenwerte jedoch in ganzzahligen Mikrometerwerten gespeichert werden, kommt es im Programm zu Rundungsfehlern.



Das Feld „Interdentalabstand“ stellt den minimalen Abstand zwischen sich überlappenden Flächen zweier Zähne dar, der angezeigt werden soll. In diesem Fall ignoriert die Flächenanzeige alle sich überlappenden Flächen, bei denen das Maß der Überlappung geringer als 5 µm ist. Das Feld „Okklusionsabstand“ stellt die Dicke der Artikulationsfolie dar, die verwendet wird.

2.4.2.6 Menüpunkt: Rückgängig

Dieser Menüpunkt dient dazu, Veränderungen, die man bei der Arbeit mit dem Programm vorgenommen hat, wieder rückgängig zu machen.



Mit dem Unterpunkt: **Extraktion** läßt sich eine durchgeführte Extraktion wieder rückgängig machen. Es erscheint das Dialogfenster „Objektauswahl“. Hier läßt sich der entsprechende Zahn auswählen.

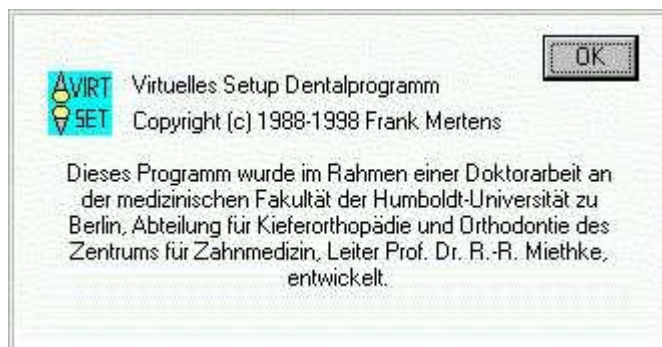
Mit dem Unterpunkt: **Einzelzahnveränderung** lassen sich Veränderungen an der Zahnstellung durch Rotieren, Verschieben oder Kontaktsuche rückgängig machen. Es erscheint ebenfalls das Dialogfenster „Objektauswahl“.

Mit den weiteren Unterpunkten lassen sich von einem durch das Dialogfenster „Objektauswahl“ gewählten Zahn die genannten Flächeneigenschaften selektiv entfernen.

2.4.2.7 Menüpunkt: ?



Dieser Menüpunkt enthält als einzigen Unterpunkt: **Info**. Dieser Punkt aktiviert das Informationsfenster zum Programm „VirtSet“:



Der Verfasser der vorliegenden Arbeit behält die Vermarktungsrechte des Programmes „VirtSet“. Er stellt jedoch der Abteilung für Kieferorthopädie und Orthodontie des Zentrums für Zahnmedizin der Humboldt-Universität zu Berlin eine lauffähige Version des Programms einschließlich der Beispieldaten und des Quellcodes zur Weiterentwicklung zur Verfügung.

2.4.3 Bedienungsanleitung Programmteil „Artikulation“

Der Programmteil Artikulation wird im Menüpunkt: **Extras** aktiviert (siehe 2.4.2.4. auf Seite 57).

Es wird ein Menüfenster dargestellt. Am unteren Fensterrand findet sich eine Dialogzeile mit Angaben zur aktuellen Artikulationsart (Okklusion, Protrusion, Laterotrusion rechts oder Laterotrusion links), dem aktuellen Schritt und der maximalen Schrittzahl, in der der Artikulationsweg berechnet wird. Diese Werte sind im Dialogfenster „Artikulation Optionen“ einstellbar (siehe 2.4.3.3.3. auf Seite 71). Der Artikulationsweg im Kiefergelenk wird nicht kontinuierlich berechnet, da dies zu einem erheblichen Rechenaufwand führen würde, sondern ist in einzelne Schritte aufgeteilt.



Mittels der Drucktasten mit den Pfeilen läßt sich der nächste oder der vorherige Artikulationsschritt anzeigen. Bei Druck auf die Drucktaste „alle Schritte“ werden die entsprechenden Artikulationsflächen für alle Schritte des Artikulationsweges berechnet und gleichzeitig dargestellt.

Das Hauptmenü wird bei der Aktivierung des Menüfensters „Artikulation“ durch ein spezielles Menü ersetzt:

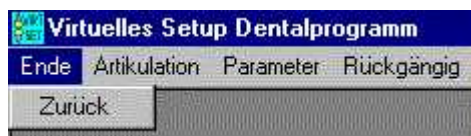


Der Mauszeiger wird, sobald er sich über dem aktivierten Fenster Artikulation befindet, durch einen lokalen Cursor ersetzt. Dieser hat die Form eines Kreuzes.

2.4.3.1 Menüpunkt: Ende

2.4.3.1.1 Unterpunkt: Zurück

Hiermit wird das Menüfenster „Artikulation“ geschlossen und man gelangt ins Hauptmenü zurück.



2.4.3.2 Menüpunkt: Artikulation



Die Unterpunkte stellen die verschiedenen Bewegungsarten des Unterkiefers dar: Okklusion, Protrusion, Laterotrusion links und Laterotrusion rechts.

Bei der Aktivierung werden die Stellungen des Unterkiefers zum Oberkiefer bei jedem der im Dialogfenster „Artikulation Optionen“ (siehe 2.4.3.3.3. auf Seite 71) einstellbaren Schritte berechnet. Dabei erscheint eine Fortschritts-Anzeige:



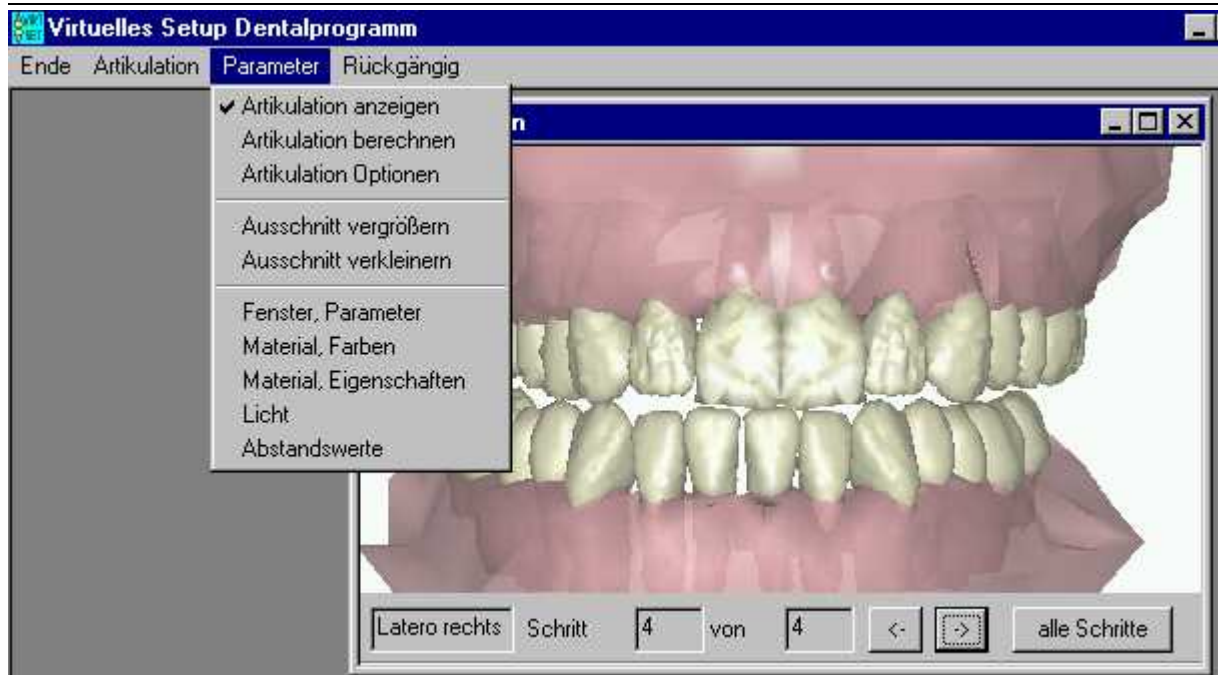
2.4.3.3 Menüpunkt: Parameter

Hier lassen sich verschiedene Ansichten einstellen.



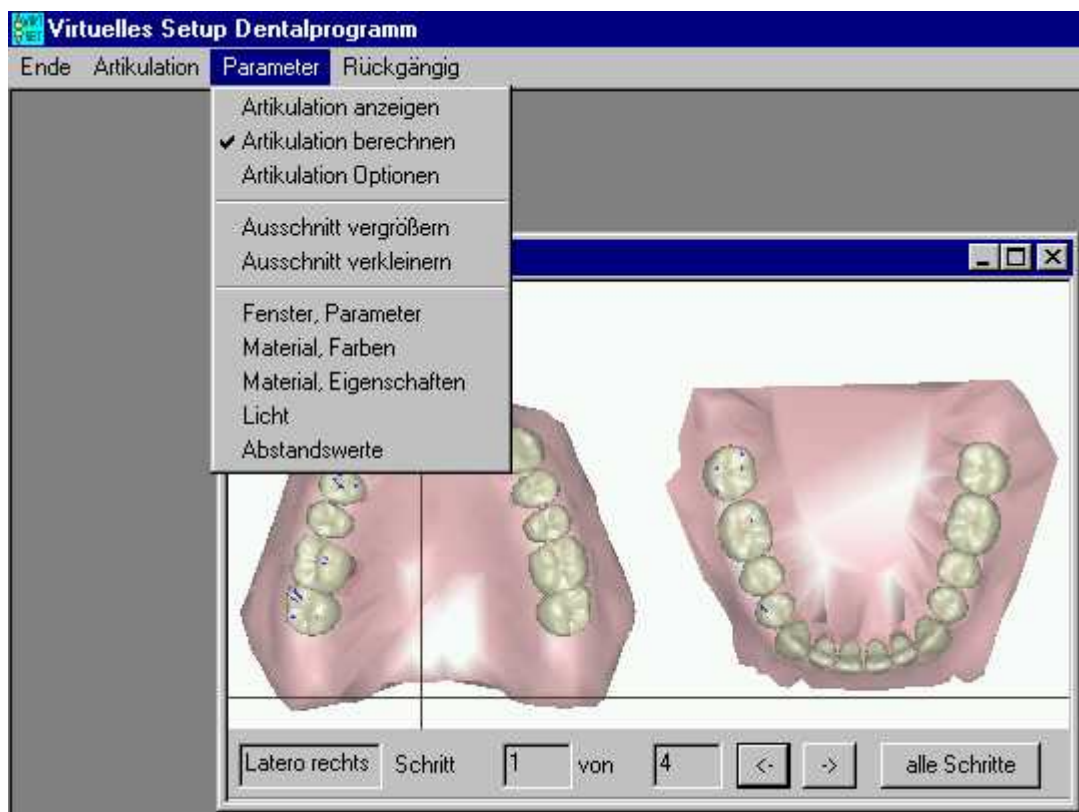
2.4.3.3.1 Unterpunkt: Artikulation anzeigen

„Artikulation anzeigen“ bedeutet, daß man beide bezahnten Kiefer in der aktuellen Artikulationsart und dem aktuellen Artikulationsschritt wie in einem geschlossenen Artikulator oder im Mund sieht.



2.4.3.3.2 Unterpunkt: Artikulation berechnen

„Artikulation berechnen“ bewirkt, daß alle Artikulationsflächen für den entsprechenden Schritt berechnet und farbig angezeigt werden. Die Kiefer liegen nebeneinander, damit man gleichzeitig die Kontaktpunkte beider Kiefer sehen kann.



2.4.3.3.3 Unterpunkt: Artikulation Optionen

Es wird das Dialogfenster „Artikulation Optionen“ angezeigt.

rechtes Kiefergelenk	linkes Kiefergelenk	Infraorbitalpunkt	Werte in μm
55000	-55000	0	
-40000	-40000	-40000	
-50000	-50000	70000	
Kiefergelenksneigung rechts			30
Kiefergelenksneigung links			35
BENNETT-Winkel rechts			15
BENNETT-Winkel links			12
Winkel zwischen Kauebene und Frankfurter Ebene			15
Artikulationsweg im KG in μm			4000
Artikulationsschritte			4

OK Abbrechen

In diesem Fenster lassen sich folgende Einstellungen vornehmen:

- „rechtes Kiefergelenk“: Es werden die Koordinaten für das rechte Kiefergelenk eingegeben.
- „linkes Kiefergelenk“: Es werden die Koordinaten für das linke Kiefergelenk eingegeben.
- „Infraorbitalpunkt“: Es werden die Koordinaten für einen Infraorbitalpunkt, beziehungsweise für den Mittelpunkt beider Infraorbitalpunkte eingegeben. Diese drei Punkte bilden die Frankfurter Ebene.
- „Kiefergelenksneigung rechts“ ist der Winkel zwischen der CAMPER'schen Ebene und der rechten Kiefergelenksbahn auf die Sagittalebene projiziert.
- „Kiefergelenksneigung links“ ist der Winkel zwischen der CAMPER'schen Ebene und der linken Kiefergelenksbahn auf die Sagittalebene projiziert.
- „BENNETT-Winkel rechts“ ist der Winkel zwischen der Mediotrusionsbahn und der Protrusionsbahn des rechten Kiefergelenkes, auf die Horizontalebene projiziert.

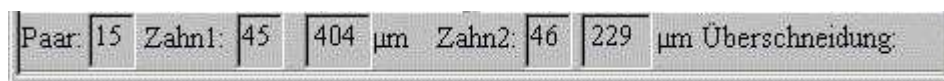
- „BENNETT-Winkel links“ ist der Winkel zwischen der Mediotrusionsbahn und der Protrusionsbahn des linken Kiefergelenkes, auf die Horizontalebene projiziert.
- „Winkel zwischen der Kauebene und der Frankfurter Ebene“: Da im Programm die Kauebene über die Einstellungen im Hauptmenü im **Menüpunkt: Parameter - Unterpunkt: Kauebenen, Parameter** (siehe 2.4.2.5.8. auf Seite 64) bekannt ist, werden alle Winkelberechnungen auf diese bezogen.
- „Artikulationsweg im Kiefergelenk in μm “: Dies ist die Wegstrecke, den die Kiefergelenksköpfchen im Kiefergelenk zurücklegen. Die einstellbare Weglänge liegt zwischen 1000 und 10000 μm .
- „Artikulationsschritte“: Der Artikulationsweg im Kiefergelenk wird nicht kontinuierlich berechnet, da dies zu einem erheblichen Rechenaufwand führen würde, sondern ist in einzelne Schritte aufgeteilt. Die Maximalzahl ist 19.

Im Programm wird davon ausgegangen, daß CAMPER'sche Ebene und Kauebene parallel sind. Für die folgenden **Unterpunkte** und den **Menüpunkt: Rückgängig** siehe die Beschreibung bei den gleichnamigen Menüpunkten im Hauptmenü auf Seite 66ff..

2.4.4 Bedienungsanleitung Programmteil „Strippen“

Der Programmteil Strippen wird im Menüpunkt: **Extras** aktiviert (siehe 2.4.2.4. auf Seite 57).

Es wird ein Menüfenster dargestellt. Am unteren Fensterrand findet sich eine Informationszeile mit Angaben zum aktuellen Zahnpaar, den jeweiligen Zahnbezeichnungen und deren Überschneidungsanteilen:



Das Hauptmenü wird bei der Aktivierung des Menüfensters „Strippen“ durch ein spezielles Menü ersetzt:



Der Mauszeiger wird, sobald er sich über dem aktivierten Fenster Strippen befindet, durch einen lokalen Cursor ersetzt. Dieser hat die Form einer Säge.

2.4.4.1 Menüpunkt: Ende

2.4.4.1.1 Unterpunkt: Zurück

Hiermit wird das Menüfenster „Strippen“ geschlossen und man gelangt ins Hauptmenü zurück.



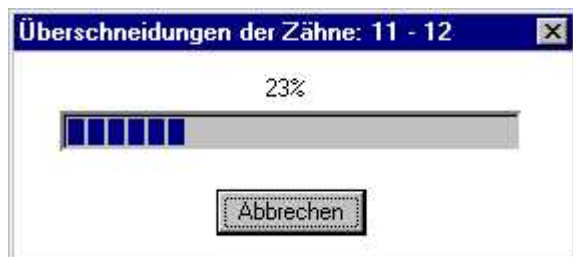
2.4.4.2 Menüpunkt: Aktion

Dieser Menüpunkt dient der Stripberechnung, der Auswahl, der Stripaktion und der Ausgabe.



2.4.4.2.1 Unterpunkt: Bereichsprüfung

Der Benutzer muß zuerst diesen Unterpunkt auswählen, bevor andere Menüteile zugänglich sind. Daraufhin werden alle benachbarten Zahnpaare auf approximales Überlappen getestet. Der Stand der Berechnung wird visuell durch eine Fortschritts-Anzeige dargestellt.



Wird die „Abbrechen“-Schaltfläche des Dialogfensters gedrückt, werden die schon berechneten überlappenden Zahnpaare in eine Liste geschrieben. Das erste berechnete Zahnpaar wird im Menüfenster dargestellt. Die Stripebene jedes dargestellten Zahnes wird als flacher Quader in der Breite des Überlappens gezeichnet.

2.4.4.2.2 Unterpunkt: Zahnpaar

Es wird das Dialogfenster „Stripliste“ ausgegeben. Dieses dient der Aktivierung des zu strippenden Zahnpaares und zeigt die aktuellen Überschneidungen an:

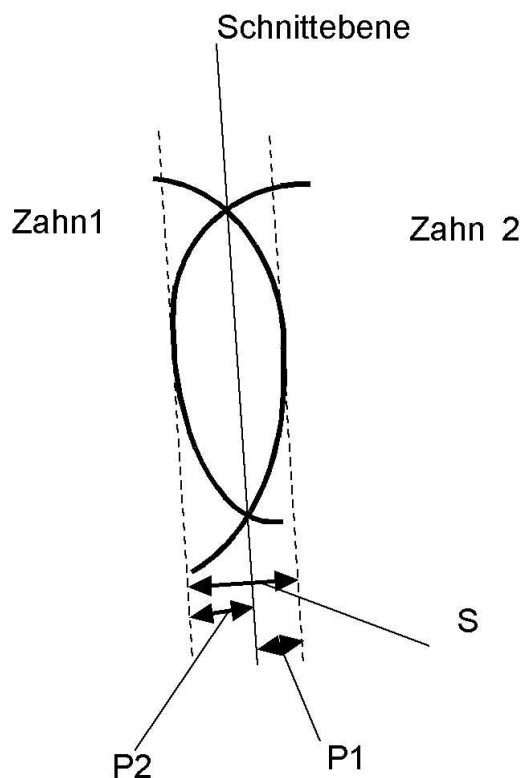
Stripliste						
Paar: 0	Z1: 12	Z2: 13	P1: 618µm	P2: 310µm	S: 929µm	
Paar: 1	Z1: 13	Z2: 14	P1: 552µm	P2: 722µm	S: 1274µm	
Paar: 2	Z1: 14	Z2: 15	P1: 10µm	P2: 606µm	S: 616µm	
Paar: 3	Z1: 16	Z2: 17	P1: 375µm	P2: 470µm	S: 846µm	
Paar: 4	Z1: 22	Z2: 23	P1: 229µm	P2: 658µm	S: 888µm	
Paar: 5	Z1: 23	Z2: 24	P1: 1250µm	P2: 151µm	S: 1402µm	
Paar: 6	Z1: 24	Z2: 25	P1: 229µm	P2: 148µm	S: 378µm	
Paar: 7	Z1: 25	Z2: 26	P1: 203µm	P2: 97µm	S: 300µm	
Paar: 8	Z1: 26	Z2: 27	P1: 506µm	P2: 677µm	S: 1184µm	
Paar: 9	Z1: 31	Z2: 32	P1: 229µm	P2: 162µm	S: 391µm	
Paar: 10	Z1: 34	Z2: 35	P1: 89µm	P2: 9µm	S: 98µm	
Paar: 11	Z1: 35	Z2: 36	P1: 402µm	P2: 227µm	S: 629µm	
Paar: 12	Z1: 36	Z2: 37	P1: 156µm	P2: 103µm	S: 260µm	
Paar: 13	Z1: 41	Z2: 42	P1: 228µm	P2: 162µm	S: 391µm	
Paar: 14	Z1: 44	Z2: 45	P1: 89µm	P2: 9µm	S: 98µm	
Paar: 15	Z1: 45	Z2: 46	P1: 404µm	P2: 229µm	S: 634µm	

OK Abbrechen

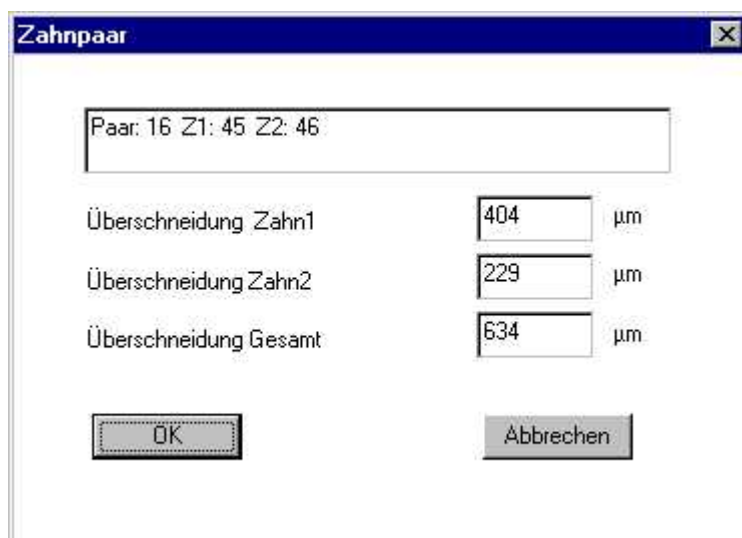
Jede Zeile der erscheinenden Liste enthält folgende Angaben:

- Paar bedeutet die fortlaufende Nummer der Zahnpaare.
- Z1 bezeichnet den ersten Zahn des Zahnpaares.
- Z2 bezeichnet den zweiten Zahn des Zahnpaares.
- P1 ist die Überschneidung anteilig am ersten Zahn.
- P2 ist die Überschneidung anteilig am zweiten Zahn.
- S ist die Summe der Überschneidungen.

Die zu strippenden Zähne werden derart verschoben, daß sich Zahnanteile überlappen. Durch die sich schneidenden Anteile wird eine Schnittebene gelegt (siehe **2.3.4. Schnittberechnung** auf Seite 30). Da die benachbarten Zähne approximal eine unterschiedliche Krümmung aufweisen können, sind die Überschneidungen unter Umständen verschieden. Bruchteile von Mikrometern werden gerundet, so daß die ausgegebene Summe ganzzahlig ist.



Um einen Listeneintrag zu modifizieren, muß der Benutzer diesen aktivieren. Daraufhin wird das Dialogfenster „Zahnpaar“ ausgegeben:



In diesem hat der Benutzer die Möglichkeit, die einzelnen vorgeschlagenen Stripbreiten frei zu verändern oder zu löschen. Bestätigt der Benutzer die eingegebenen Werte durch Druck auf die „OK“-Taste, wird der im Menüfenster „Strippen“ dargestellte Stripebenenquader den neuen Werten angepaßt.

2.4.4.2.3 Unterpunkt: Nächstes Paar

Es wird ohne Aufruf eines Dialoges das nächste Zahnpaar dargestellt.

2.4.4.2.4 Unterpunkt: Vorheriges Paar

Es wird ohne Aufruf eines Dialoges das vorherige Zahnpaar dargestellt.

2.4.4.2.5 Unterpunkt: Strippen

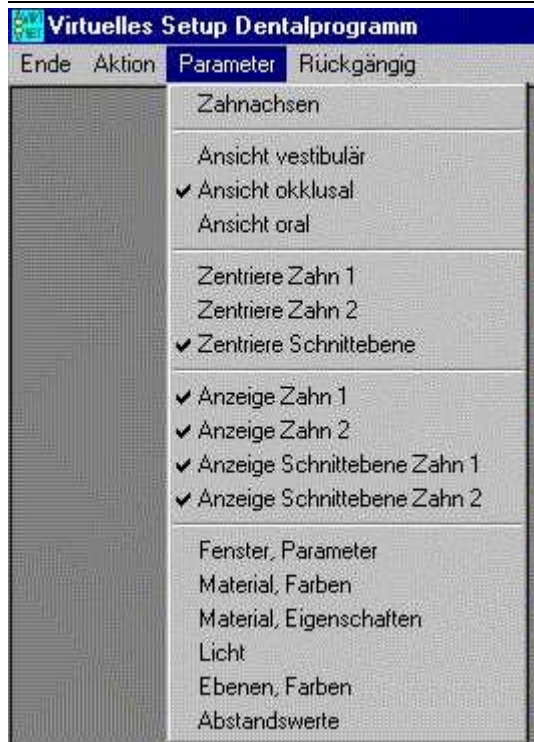
Es wird von beiden Zähnen ein Bereich abgeschnitten, der dem Anteil von P1 und P2 entspricht. Die geänderten Zahndaten werden gespeichert. Die Einträge in der Stripliste werden auf Null gesetzt. Es erscheint bei erfolgreichem Strippen eine Informationsbox. Die gestrippten Zähne werden im Menüfenster dargestellt. Ihr jeweiliger Stripebenenquader hat die Breite Null.

2.4.4.2.6 Unterpunkt: Drucken

Es erscheint ein Windows®-Drucken-Dialogfenster, das es erlaubt, Drucker und Druckoptionen zu wählen. Dann wird die Ausgabe, die normalerweise auf den Bildschirm in das Menüfenster erfolgt, auf den Drucker umgeleitet. Auch die Informationen, die am unteren Rand des Menüfensters in der Dialogleiste stehen, werden ausgedruckt (siehe auch **2.4.2.1.2. Unterpunkt: Drucke aktive Ansicht** auf Seite 45).

2.4.4.3 Menüpunkt: Parameter

Hier lassen sich verschiedene Ansichten einstellen.



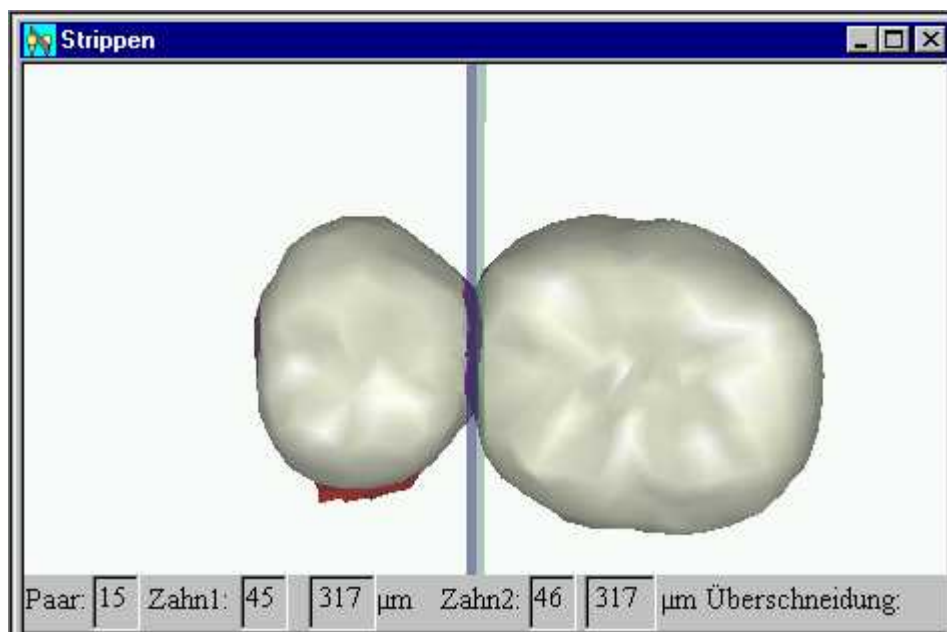
Die Erläuterung zum **Unterpunkt: Zahnachsen** siehe 2.4.2.2.9. auf Seite 53.

2.4.4.3.1 Unterpunkt: Ansicht vestibulär

Dies ist die Standardeinstellung. Die Zähne werden in der Ansicht von vestibulär aus dargestellt.

2.4.4.3.2 Unterpunkt: Ansicht okklusal

Die Zähne werden in der Ansicht von okklusal beziehungsweise von inzisal dargestellt.



2.4.4.3.3 Unterpunkt: Ansicht oral

Die Zähne werden in der Ansicht von oral dargestellt.

2.4.4.3.4 Unterpunkt: Zentriere Zahn 1

Die Ansicht bezieht sich auf die Achsen von Zahn 1. Der Zahn wird in die Fenstermitte gestellt.

2.4.4.3.5 Unterpunkt: Zentriere Zahn 2

Die Ansicht bezieht sich auf die Achsen von Zahn 2. Der Zahn wird in die Fenstermitte gestellt.

2.4.4.3.6 Unterpunkt: Zentriere Schnittebene

Die Ansicht bezieht sich auf die Projektion der äquivalenten Achsen beider Zähne auf die Schnittebene. Der Betrachterstandpunkt wird zur Schnittebene parallelisiert. Die Schnittebene wird in die Fenstermitte gestellt.

Im dargestellten Beispiel (siehe oben) wurde diese Zentrierung gewählt.

In den **Unterpunkten Anzeige Zahn 1, Anzeige Zahn 2, Anzeige Schnittebene Zahn 1 und Anzeige Schnittebene Zahn 2** kann man die Ansicht selektiv auswählen.

Für die folgenden Menüpunkte siehe die Beschreibung bei den gleichnamigen Menüpunkten im Hauptmenü (**2.4.2.5.ff** auf Seite 57).

2.4.4.4 Menüpunkt: Rückgängig

Der einzige Unterpunkt: **Strippen** lädt die nicht gestrippten Zahndateien der Zähne des aktuellen Zahnpaars in den Speicher, so daß eine zuvor vorgenommene Stripaktion rückgängig gemacht wird.

2.4.5 Bedienungsanleitung Programmteil „Objekt erstellen“

2.4.5.1 Bedienungshinweise

Der Programmteil Objekt erstellen (siehe **2.4.2.4. Menüpunkt: Extras** auf Seite 57) besteht aus zwei Fenstern mit den Titeln „Objekt erstellen 1“ und „Objekt erstellen 2“ und einer eigenen Menüzeile.

Es ist sinnvoll, für jedes Fenster eine Einstellung zu finden, in der sowohl die Punktedateien als auch die symmetrierten Objekte angezeigt werden können.

Das Objekt sollte in beiden Fenstern von einem unterschiedlichen Blickpunkt aus betrachtet werden können, damit man einen räumlichen Eindruck gewinnen kann und um einen Punkt dreidimensional bestimmen und verändern zu können.

Punktmarkierung:

In diesem Programmteil hat die Maus eine spezielle Funktion bei der Spezialpunkt- und Symmetriepunktbearbeitung. Wird in einem Fenster ein Punkt durch Einfachklick auf die linke Maustaste markiert (es erscheint ein Kreuz, das das gesamte Fenster ausfüllt), erscheint im anderen Fenster eine Linie, die alle Punkte bezeichnet, auf die die Markierung im ersten Fenster zutrifft. Im zweiten Fenster läßt sich nun einer dieser Punkte wieder durch Einfachklick auf die linke Maustaste markieren. Da jedes Fenster eine zweidimensionale Projektion eines dreidimensionalen Raumes (es werden nur die X- und die Y-Achsen verwendet) ist, fehlt bei Markierung eines Punktes in jedem Fenster die Z-Achse. Man kann jedoch die Markierung als eine Gerade interpretieren, die am Bildschirmpunkt in die Tiefe geht. Besitzen nun beide Fenster einen unterschiedlichen Blickpunkt und eine unterschiedliche Blickrichtung auf das Objekt, sind diese Geraden also nicht parallel zueinander.

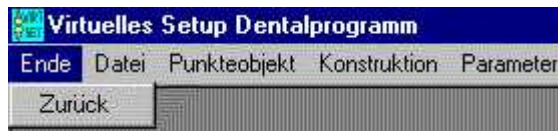
Haben die Geraden einen Schnittpunkt im Weltkoordinatensystem, ist dieser der gesuchte und markierte Punkt. Verlaufen die Geraden jedoch windschief, wird der Punkt ermittelt, der zu beiden Geraden den geringsten Abstand besitzt. Diese abschließende Berechnung wird durch einen Einfachklick auf die rechte Maustaste durchgeführt und ist Voraussetzung für etliche Unterpunkte. Es erscheint an der Stelle des markierten Punktes ein kleines Fadenkreuz.

Menü: **Objekt erstellen**



2.4.5.2 Menüpunkt Ende

2.4.5.2.1 Unterpunkt: Zurück



Hiermit werden die Menüfenster „Objekt erstellen 1“ und „Objekt erstellen 2“ geschlossen und man gelangt ins Hauptmenü des Programms „VirtSet“ zurück.

2.4.5.3 Menüpunkt: Datei



2.4.5.3.1 Unterpunkt: Öffnen Punktedatei

Es wird ein Windows®-Datei-Öffnen-Dialogfenster geöffnet (siehe **2.4.2.1.1. Unterpunkt: Öffnen** auf Seite 43) und darin Punktedateien (Extension *.xxx) oder Wurzeldateien (Extension *.wzl) angezeigt. Hat man eine Punktedatei ausgewählt, so erscheint eine Fortschritts-Anzeige (siehe **2.4.2..2.5. Unterpunkt: Kontakt** auf Seite 50), während das Punkteformat konvertiert wird. Danach werden die Punkte in der Farbe Pink in beiden „Objekt erstellen“-Fenstern angezeigt und man kann diese weiter bearbeiten. Die Farbe Pink ist hier fest codiert und nicht einstellbar.

2.4.5.3.2 Unterpunkt: Sichern Punktedatei

Dieser Unterpunkt dient der erneuten Speicherung einer bearbeiteten Punktedatei. Während eine Datenkonvertierung durchgeführt wird, erscheint eine Fortschritts-Anzeige (siehe **2.4.2.2.5. Unterpunkt: Kontakt** auf Seite 50). Anschließend wird ein Windows®-Datei-Speichern-Dialog geöffnet (siehe **2.4.2.1.1. Unterpunkt: Öffnen** auf Seite 43) und man kann die Datei, die

aktualisiert werden soll, angeben oder einen nicht existenten Namen eingeben, um eine neue Datei zu erstellen. Die gezeigten Dateien sind entweder Punktedateien (Extension *.xxx) oder Wurzeldateien (Extension *.wzl).

2.4.5.3.3 Unterpunkt: Öffnen Objektdatei

Es wird ein Windows®-Datei-Öffnen-Dialog (siehe **2.4.2.1.1. Unterpunkt: Öffnen** auf Seite 43) und darin Objektdateien mit der Extension *.fra angezeigt. Objektdateien sind bereits fertig berechnete Objekte aus Punktedatei, eventuell Wurzeldatei und Spezialpunktedatei. Man nutzt diesen Menüpunkt, wenn man nur noch Änderungen an der Stellung des Objektes oder an den Spezialpunkten vornehmen möchte.

2.4.5.3.4 Unterpunkt: Sichern Objektdatei

Es wird, ohne ein Dialogfenster anzuzeigen, das bearbeitete Objekt unter seiner eingestellten Bezeichnung im aktuellen Pfad mit der Extension *.fra gespeichert.

2.4.5.3.5 Unterpunkt: Sichern Miniobjektdatei

Das bearbeitete Miniobjekt wird, ohne ein Dialogfenster anzuzeigen, unter seiner eingestellten Bezeichnung im aktuellen Pfad mit der Extension *.frm gespeichert. Dem Miniobjekt fehlen im Gegensatz zum normalen Objekt die Kantenreferenzen, und es benötigt weniger Speicherplatz für die Punkte und Flächen. Die Kantenreferenzen werden nur dort benötigt, wo am Objekt eine Veränderung wie zum Beispiel beim Strippen vorgenommen werden soll. In den übrigen Programmteilen wird mit dem Miniobjekt gerechnet.

2.4.5.3.6 Unterpunkt: Erstelle Parameterdatei neu

Es wird die Parameterdatei (Extension *.par) für das eingestellte Objekt auf Null gesetzt. Die Parameterdatei eines Zahnes beinhaltet die Rechenvorschriften (Matrizes) für die Übertragung des Zahnkoordinatensystems in das Koordinatensystem des jeweiligen Kiefers in der Ursprungsstellung und in der aktuellen Änderung. Die Parameterdatei eines Kiefers beinhaltet die entsprechenden Matrizes für die Übertragung des Kieferkoordinatensystems in das Weltkoordinatensystem.

2.4.5.4 Menüpunkt: Punkteobjekt



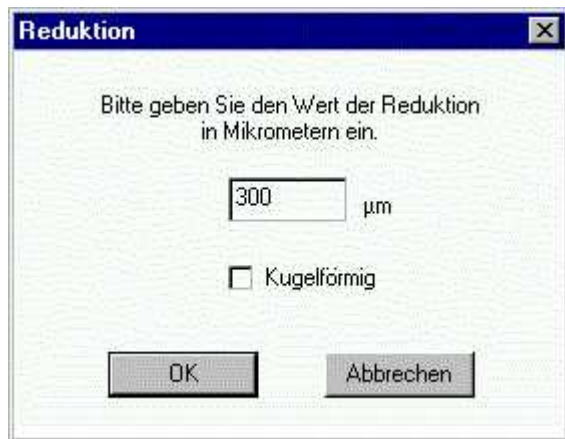
Nachdem eine Punktedatei geladen wurde, läßt sie sich mit Hilfe dieses Menüpunktes bearbeiten.

2.4.5.4.1 Unterpunkt: Symmetrieren

Voraussetzung ist, daß eine Punktedatei geladen und ein Symmetriepunkt markiert wurde (siehe Punktmarkierung in: **2.4.5.1. Bedienungshinweise** auf Seite 79). Mit diesem Programmpunkt wird der Mittelpunkt des Koordinatensystems des zu berechnenden Objektes an die Stelle des Symmetriepunktes verschoben. Es ist sinnvoll, eine Fenstereinstellung zu wählen, in der der Mittelpunkt des Koordinatensystems in der Mitte der Fenster liegt.

2.4.5.4.2 Unterpunkt: Punktreduktion

Dieser Unterpunkt dient dazu, die Punktedatei zu verkleinern, indem Punkte, die einen geringeren Abstand als den einstellbaren Reduktionswert zu anderen Punkten aufweisen, eliminiert werden. Es erscheint das Dialogfenster „Reduktion“:



Hier läßt sich der Reduktionswert einstellen. Aktiviert man die Abfrage „Kugelförmig“, so werden alle Punkte auf eine Kugeloberfläche um den Koordinatenursprungspunkt projiziert, wobei der Radius gemittelt wird. Erst dann erfolgt die Punktereduktion.

2.4.5.4.3 Unterpunkt: Punkt einfangen

Voraussetzung ist, daß eine Punktedatei geladen und ein Punkt markiert wurde (siehe Punktmarkierung in: **2.4.5.1. Bedienungshinweise** auf Seite 79). Hiermit wird der dem markierten Punkt am nächsten liegende tatsächliche Punkt der Punktedatei ermittelt. Es erscheint das Dialogfenster „eingefangener Punkt“:



Es werden die Punktnummer und die Objektkoordinaten des Punktes ausgegeben. Der eingefangene Punkt wird in den Fenstern durch ein Fadenkreuz angezeigt, so daß der Benutzer seine Wahl überprüfen kann. Mit den Drucktasten „vorheriger Punkt“ und „nächster Punkt“ wird zu den entsprechend benachbarten Punkten der Punktedatei gewechselt. Mit der Drucktaste „Punkt löschen“ wird der Punkt aus der Punktedatei gelöscht.

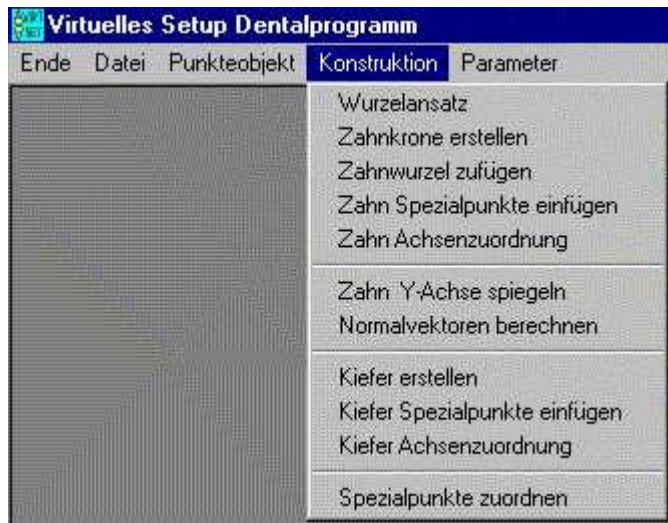
2.4.5.4.4 Unterpunkt: Punkt einfügen

Voraussetzung ist das Öffnen einer Punktedatei und das Markieren eines Punktes (siehe Punktmarkierung in: **2.4.5.1. Bedienungshinweise** auf Seite 79). Hiermit wird der Punktedatei an der Stelle des markierten Punktes ein tatsächlicher Punkt eingefügt.

2.4.5.4.5 Unterpunkt: Punkt berechnen

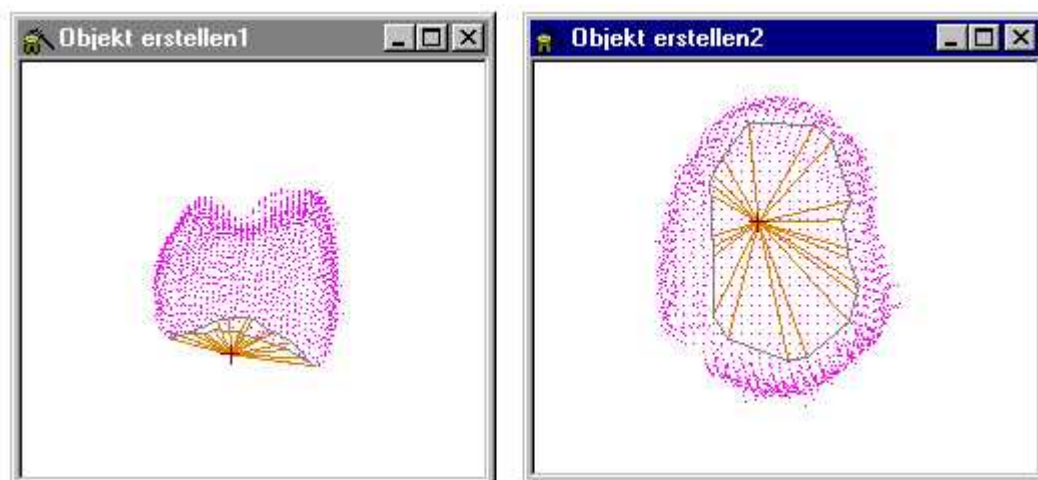
Voraussetzung ist das Markieren eines Punktes in jedem Fenster durch Einfachklick auf die linke Maustaste. Es erscheint jeweils ein Fadenkreuz, das die Größe eines Fensters hat. Durch Aktivierung dieses Menüpunktes oder Einfachklick auf die rechte Maustaste wird der tatsächliche Punkt berechnet und mit einem kleinen Fadenkreuz markiert (zur Mathematik siehe **2.3.8. Schnittpunktberechnung** auf Seite 39).

2.4.5.5 Menüpunkt: Konstruktion



2.4.5.5.1 Unterpunkt: Wurzelansatz

Voraussetzung ist wiederum, daß eine Punktedatei geladen und ein Punkt markiert wurde (siehe Punktmarkierung in: **2.4.5.1. Bedienungshinweise** auf Seite 79), der zentral im Bereich der Schmelz-Zement-Grenze im Zahn liegt. Das Programm berechnet dann den Wurzelansatz, das heißt den Bereich der Zahnkrone, an den die Wurzel ansetzt, indem es alle Punkte, die dem ausgewählten Punkt und dem meßpunktfreien Bereich des Wurzelansatzes benachbart sind, verbindet. Alle anderen Punkte der Zahnkrone lassen sich nun zu einem geschlossenen Körper, der Zahnkrone, zusammensetzen. Der Sinn der Wurzelansatzberechnung ist, Fehler des Programmes bei der Zahnkronenberechnung zu vermeiden und später die Möglichkeit zu haben, konfektionierte oder individuelle Zahnwurzeln ansetzen zu können.



2.4.5.5.2 Unterpunkt: Zahnkrone erstellen

Es erscheint ein Objekt-Auswahl-Dialog, in den die Bezeichnung des Objektes eingegeben wird (siehe **2.4.2.3.2. Unterpunkt: Extrahieren** auf Seite 55).

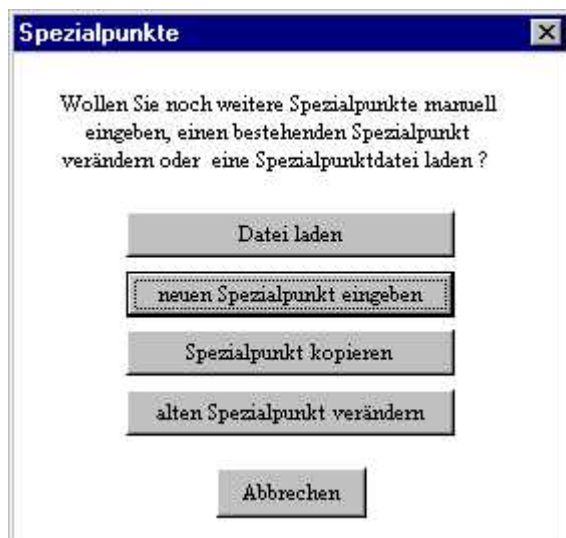
Während das Objekt berechnet wird, erscheint eine Fortschritts-Anzeige. Schon berechnete Kanten werden orange dargestellt. Die Wachstumsgrenze der Berechnung wird grün dargestellt.

2.4.5.5.3 Unterpunkt: Zahnwurzel zufügen

Es wird ein Windows®-Datei-Öffnen-Dialog angezeigt, mit dem die Wurzeldatei mit der Extension *.wzl geladen werden muß. Während die Wurzel an der Stelle des Wurzelansatzes angefügt wird, erscheint wiederum eine Fortschritts-Anzeige.

2.4.5.5.4 Unterpunkt: Zahn Spezialpunkte einfügen

Es erscheint das Dialogfenster „Spezialpunkte“, in dem Spezialpunktbearbeitungen durchgeführt werden.



2.4.5.5.4.1 Drucktaste: Datei laden

Zuerst muß mit dieser Drucktaste eine Spezialpunktdatei mit der Extension *.spp für das bearbeitete Objekt geöffnet werden. Dazu wird ein Windows®-Datei-Öffnen-Dialogfenster sichtbar (siehe **2.4.2.1.1. Unterpunkt: Öffnen** auf Seite 43).

2.4.5.5.4.2 Drucktaste: neuen Spezialpunkt eingeben

Hier ist Voraussetzung, daß ein Punkt markiert wurde (siehe Punktmarkierung in **2.4.5.1. Bedienungshinweise** auf Seite 79). Es erscheint das Dialogfenster „Auswahl neuer

Spezialpunkt“ mit der Möglichkeit, den Namen des Standardspezialpunktes aus einer Liste auszuwählen oder direkt einzugeben.



In der Liste sind die sechs Standardspezialpunkte aufgeführt:

MES_APP	=	mesialer Approximalpunkt
DIST_APP	=	distaler Approximalpunkt
ORAL	=	oraler Punkt
VEST	=	vestibulärer Punkt
APIK	=	Apexpunkt
OKK_INZ	=	okklusaler oder inzisaler Punkt

Üblicherweise wird diese Methode verwendet, um den apikalen Punkt zu bestimmen, da dieser bei der Messung der Spezialpunkte mit dem „Reflex Mikroskop“ oder einem Laser-triangulationsverfahren nicht erfaßt wird.

2.4.5.5.4.3 Drucktaste: Spezialpunkt kopieren

Da initial den Standardspezialpunkten keine Koordinaten zugeordnet sind, besteht hiermit die Möglichkeit, diesen Koordinaten der dazugeladenen Spezialpunkte zuzuweisen.

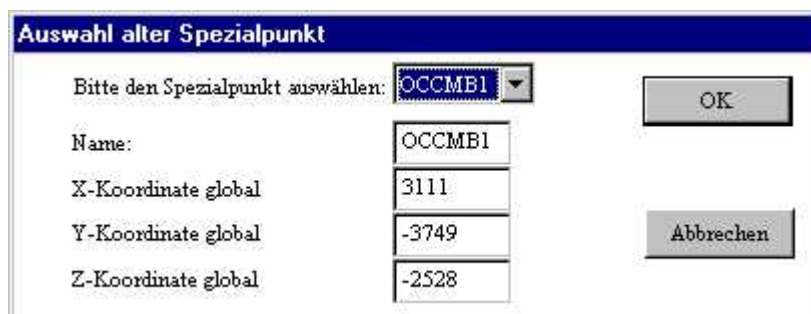
Üblicherweise wird man den mesialen und distalen Approximalpunkt kopieren, da diese Punkte später der Berechnung des Koordinatenursprungs und der X-Achse dienen(siehe **2.3.9. Berechnung der Achsen** auf Seite 40. Es erscheint das Dialogfenster „Spezialpunkte kopieren“ .



Nachdem man aus den Listefeldern „Quelle“ und „Ziel“ den zu kopierenden Spezialpunkt und den Zielort der Kopie bestimmt hat, wird durch Druck auf die Drucktaste „Kopieren“ die Kopie durchgeführt.

2.4.5.5.4.4 Drucktaste: alten Spezialpunkt verändern

Nach Anzeige des Dialogfensters „Auswahl alter Spezialpunkt“ lassen sich nacheinander alle existierenden Spezialpunkte mit ihren Koordinaten aufrufen. Die Position der aufgerufenen Spezialpunkte wird gleichzeitig in den beiden Fenstern „Objekt erstellen 1“ und „Objekt erstellen 2“ mit einem kleinen Fadenkreuz dargestellt. Die Namen und die globalen Koordinaten können geändert werden.



2.4.5.5.5 Unterpunkt: Zahn Achszuordnung

Die Berechnung der Koordinatenachsen für ein Zahnobjekt wird nur dann durchgeführt, wenn bereits die Standardspezialpunkte für den mesialen und distalen Approximalpunkt und den apikalen Punkt eingegeben wurden. Zur Mathematik siehe **2.3.9. Berechnung der Achsen** auf Seite 40.

2.4.5.5.6 Unterpunkt: Zahn Y-Achse spiegeln

Da bei der Messung mit dem „Reflex Mikroskope“ nur der zweite und der dritte Quadrant vermessen wurden, bedurfte es noch der Möglichkeit die Zahnobjekte zu spiegeln. Es wird so

gespiegelt, daß sich die gespiegelten Zahnobjekte im selben Kiefer befinden. Die Spiegelung erfolgt an der X-Z-Ebene, indem die Y-Koordinaten aller Punkte und aller Spezialpunkte invertiert werden. Die Reihenfolge der drei Punkte für jede Fläche wird geändert, da sich durch die Spiegelung Außen- in Innenflächen verwandeln. Abschließend werden die Koordinaten für die Standardspezialpunkte oraler und vestibulärer Punkt vertauscht, da sonst die Definition der Y-Achse nicht mehr stimmen würde.

Aus dem Zahnobjekt 21 wird durch die Spiegelung das Zahnobjekt 11.

2.4.5.5.7 Unterpunkt: Normalvektoren berechnen

Der jeweilige globale Flächennormalvektor berechnet sich für alle Flächen durch die GAUßsche Formel. Nun wird für jeden Punkt die Vektorsumme aus den globalen Flächennormalvektoren der an ihn grenzenden Flächen gebildet und dieser Vektor normiert. Jeder Punktnormalvektor wird zusammen mit den Punktkoordinaten an OpenGL[®] übergeben und dient der realitätsnahen Darstellung.

2.4.5.5.8 Unterpunkt: Kiefer erstellen

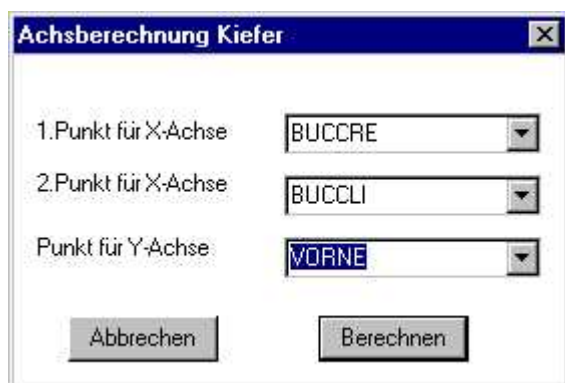
Dieser Menüpunkt ist vergleichbar mit dem **Unterpunkt: Zahnkrone erstellen** (siehe 2.4.5.5.2. auf Seite 85).

2.4.5.5.9 Unterpunkt: Kiefer Spezialpunkte einfügen

Dieser Menüpunkt ist vergleichbar mit dem **Unterpunkt: Zahn Spezialpunkte einfügen** (siehe 2.4.5.3.4.4.).

2.4.5.5.10 Unterpunkt: Kiefer Achszuordnung

Es erscheint das Dialogfenster „Achsberechnung Kiefer“.

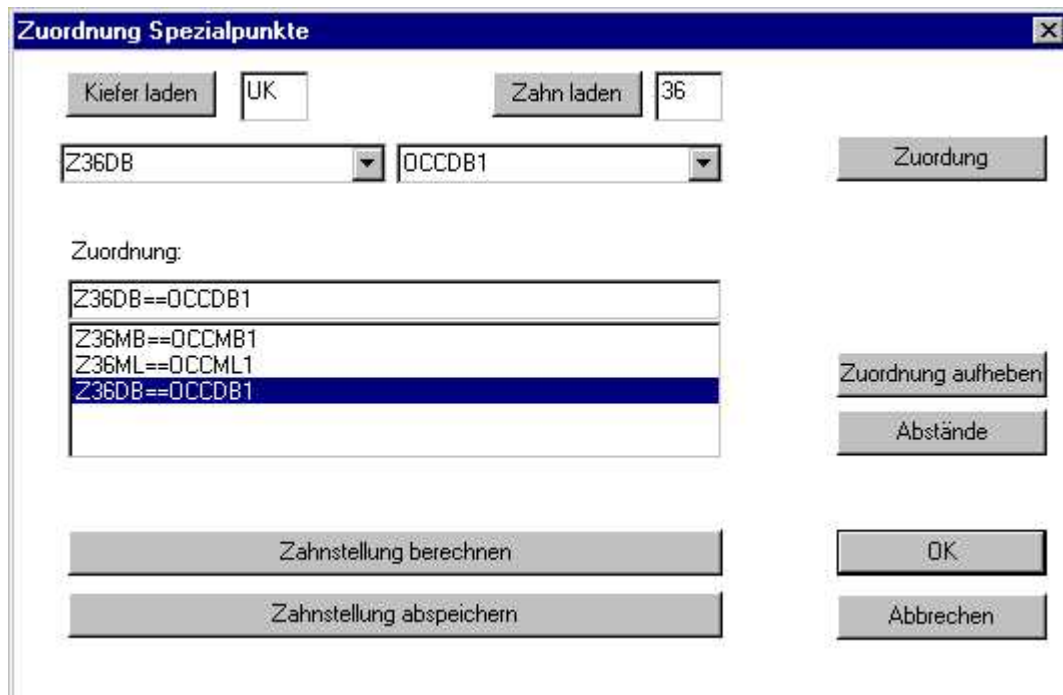


Zur Berechnung des Koordinatensystems des Kieferobjektes werden drei Spezialpunkte verlangt, zwei zur Berechnung der X-Achse und einer zur Berechnung der Y-Achse.

Zur Mathematik siehe **2.3.9. Berechnung der Achsen** auf Seite 40.

2.4.5.5.11 Unterpunkt: Spezialpunkte zuordnen

Das Dialogfenster „Zuordnung Spezialpunkte“ erscheint:



Dieses dient der Erstellung der Matrizes zur Transformation von Zahn- zu Kieferkoordinaten (siehe auch **2.3.10. Berechnungen bei der Zuordnung der Spezialpunkte** auf Seite 41). Die beiden Drucktasten „Kiefer laden“ und „Zahn laden“ dienen dem Zweck, die gewünschten Objekte zu laden. Dazu wird jeweils ein Windows®-Datei-Öffnen-Dialogfenster angezeigt. In den darunter liegenden Listenfeldern werden die Namen der Spezialpunkte ausgewiesen. Ziel ist es, drei sich einander entsprechende Spezialpunkte auszuwählen und mit der Drucktaste „Zuordnung“ in Beziehung zu setzen. Die Zuordnung wird jeweils in dem Listenfeld „Zuordnung“ angezeigt. Die Drucktaste „Zuordnung aufheben“ macht Zuordnungen wieder rückgängig, falls man hier Fehler gemacht hat.

Die Drucktaste „Zahnstellung berechnen“ berechnet anhand der jeweils drei angegebenen Spezialpunkte die Genauigkeit der Messung und gibt diese im Dialogfenster „Genauigkeit“ aus.



Die hier aufgetretene Differenz zwischen den entsprechenden Punkten sollte im Rahmen der Meßungenauigkeit des erfassenden Gerätes liegen. Bei der Messung mit dem „Reflex Mikroskope“ lag die Differenz in der Regel unter 100 µm.

Mit der Drucktaste „Zahnstellung speichern“ wird die berechnete Matrix schließlich im angegebenen Pfad unter dem Namen des angegebenen Zahnes mit der Extension *.par gespeichert.

2.4.5.6 Menüpunkt: Parameter



Zur Beschreibung der ersten sechs Unterpunkte wird auf die Beschreibung in **2.4.2.5. Menüpunkt: Parameter** auf Seite 57 verwiesen.

2.4.5.6.1 Unterpunkt: Beleuchtet

Mit dieser Einstellung wird zwischen den Darstellungsarten „Flächenbeleuchtung“ (Einstellung: beleuchtet) und „Kantenanzeige“ (Einstellung: nicht beleuchtet) gewechselt. Zur richtigen Interpolation der Oberfläche in dem Unterpunkt: **Beleuchtet** ist es notwendig, vorher mit **dem Menüpunkt: Konstruktion - Unterpunkt: Normalvektoren berechnen** (siehe **2.4.5.5.7.** auf Seite 88) die Normalvektoren für die Oberflächenpunkte zu bestimmen.

3 Diskussion

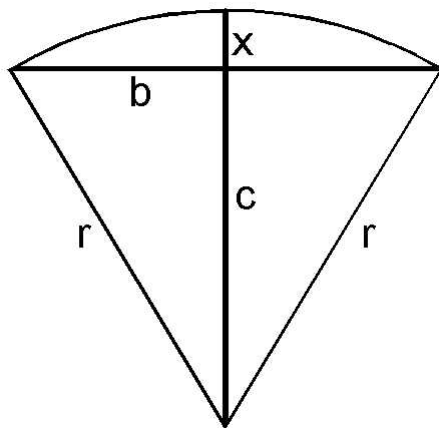
3.1 Genauigkeit

3.1.1 Genauigkeit bei der Oberflächenberechnung

Da das Programm die Oberfläche in einzelne Flächenstücke unterteilt und diese mathematisch als plane Dreiecksflächen betrachtet, ein Zahn jedoch eine gekrümmte Oberfläche besitzt, kommt es im Programm zu Ungenauigkeiten.

Diese treten insbesondere bei Okklusions- und Artikulationsberechnungen und bei den Kontaktpunktroutinen auf.

Man kann eine Krümmung näherungsweise durch einen Kreisbogen mit dem Radius r beschreiben. Die Breite b jedes Rasterelementes (Kante einer Dreiecksfläche) stellt eine Sekante dar, die den Kreisbogen bestimmt. Die größte Differenz x zwischen Dreiecksfläche und tatsächlicher Oberfläche liegt in der Mitte der Sekante b .



Sie lässt sich wie folgt berechnen:

$$x = r - c$$

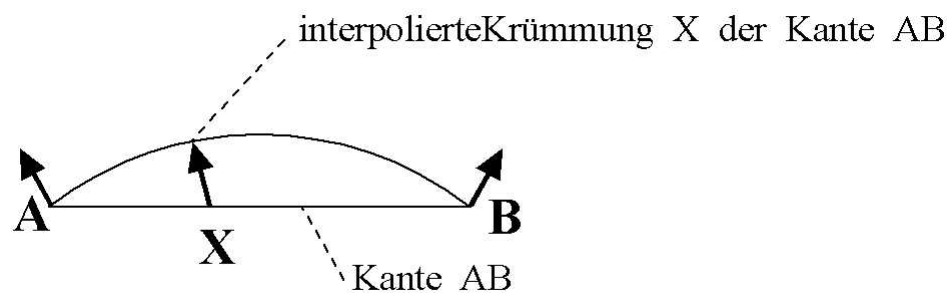
$$c = \sqrt{r^2 - b^2/4} \quad \longrightarrow$$

$$x = r - \sqrt{r^2 - b^2/4}$$

Beispiel:

Nimmt man für den Radius einen Wert von zwei mm (etwa ein Molarenhöcker) an, erhält man bei einem durchschnittlichen Punktabstand von 400 μm eine Ungenauigkeit von etwa 10 μm .

Diese Ungenauigkeit, die besonders bei der Kontaktpunktsuche auftritt, wäre zu minimieren, wenn man anhand der berechneten Punktnormalvektoren der Eckpunkte einer Dreiecksfläche die Krümmung für diese Fläche interpolieren würde:



Da der Rechenaufwand für die Kontaktpunktsuche aber schon erheblich ist, wurde in diesem Programm auf eine Flächeninterpolation verzichtet. Diese Ungenauigkeit läßt sich auch dadurch verringern, indem bei der Zahn- und Kieferdatenerfassung eventuell durch Einsatz eines Lasertriangulationsverfahren eine höhere Punktdichte erzielt wird.

3.1.2. Rundungsfehler

Da in dem Programm „VirtSet“ die Werte für die Punktkoordinaten ganzzahlig in Mikrometer gespeichert werden, wird nach einigen Rechenoperationen zur nächsten ganzzahligen internen Einheit auf- oder abgerundet. Dabei tritt bei der Berechnung mit Koordinaten jeweils ein Rundungsfehler von maximal $0.5\mu\text{m}$ auf. Die Ausgaben der Veränderungen durch Verschiebungen und bei der Stripberechnung unterliegen diesem Rundungsfehler. Die Ausgabe der Veränderungen durch Rotationen beinhaltet jeweils einen Rundungsfehler von maximal 0.5 Grad. Bei der Darstellung am Bildschirm ist ein Rundungsfehler nur zu bemerken, wenn ein extremer Zoom auf eine einzelne Dreiecksfläche ausgeführt wird.

In dem Programm „VirtSet“ könnten die Rundungsfehler auf den Bereich der internen Rechengenauigkeit (siehe unten) gesenkt werden, wenn die Koordinaten als Fließkommazahlen gespeichert würden und die Ausgabe der Veränderungen ebenfalls in Fließkommazahlen vorgenommen würde. Die Speicherung der Koordinaten als Fließkommazahlen würde den Speicherbedarf für jeden Punkt verdoppeln; das Programm würde dadurch etwa zwei MByte des Hauptspeichers mehr beanspruchen.

3.1.2 Interne Rechengenauigkeit

Die interne Rechengenauigkeit ist abhängig von Prozessor und Compiler. Die globalen Punktkoordinaten werden als Long-Werte abgelegt. Bei Berechnungen werden sie explizit in Fließkommazahlen umgewandelt. Es wird mit einer Genauigkeit 8 Byte gerechnet, dies sind etwa 16 Ziffern. Der Wertebereich des Exponenten liegt bei $1.7 \text{ E}+/-308$.

3.1.3 Genauigkeit der Beispieldaten

Die eingestellte Lichtpunktgröße von 20 μm stellt die Genauigkeit bei idealer Messung dar. Da bei der Vermessung eines Zahnes dieser in der Regel von fünf Seiten betrachtet werden muß, führt jede Änderung der durch die jeweils notwendig werdende Kalibrierung zur Summation einzelner Fehler. Dies wird besonders deutlich bei den Zähnen 21 und 22. Die stark reflektierende Oberfläche der Zähne, deren Reflexionsverhalten durch das Einreiben mit Graphitstaub nur teilweise aufgehoben werden konnte, verhinderte örtlich das Erkennen des Laserpunktes, so daß in solchen Fällen eine Fehlmessung bis zu etwa 300 μm auftrat. Ebenso führte die hohe Zahl an Meßpunkten für einen Zahn (etwa 2000) zu Ermüdungserscheinungen und damit zu Meßfehlern bis zu 250 μm .

Die Genauigkeit der Datenerfassung durch Lasertriangulationsverfahren liegt je nach verwendetem System zwischen 25 und 50 μm [2,16].

3.2 Geschwindigkeit

Die Geschwindigkeitsangaben beziehen sich auf die verwendete Hardwareausstattung.

- Darstellung: Durch den Einsatz des Graphiksystems von OpenGL® erfolgt der Bildaufbau in etwa vier Sekunden.
- Überschneidungsprüfung: Die Dauer von zirka 10 Sekunden je Zahn ist akzeptabel.
- Kontaktprüfung: Die Geschwindigkeit der Kontaktprüfung bleibt mit etlichen Minuten Dauer unbefriedigend. Hier wäre eine Überarbeitung bezüglich der mathematischen und programmatischen Techniken notwendig. Da es im Bereich des Militärwesens und des Maschinenbaus zu ähnlichen Problemen bei der Kontaktpunktsuche kommt, werden bessere Algorithmen als im vorgestellten Programm existieren, deren Anwendung jedoch dem Informatiker vorbehalten bleibt.
- Artikulationsberechnung: Die Artikulationsberechnung dauert je Schritt etwa eine Minute, was sicherlich zu verbessern wäre.
- Stripberechnung: Einige Minuten Dauer beim Strippen pro Zahnpaar sind nur unwesentlich aufwendiger als beim realen Setup.

Bezüglich der Geschwindigkeit ist das Programm dem realen Setup sicherlich nicht überlegen.

Die Vermessung je Zahn am Meßmikroskop dauerte etwa vier Stunden, die Übertragung der Datenformate zirka eine Stunde und die Berechnung mit dem Programmteil Objekt erstellen rund eine Stunde.

Das System von KURODA[16] vermißt einen kompletten Kiefer innerhalb von 40 Minuten, wobei hierbei die Zähne mathematisch nicht isoliert betrachtet werden. Für das virtuelle Setup werden sie am Computer vergleichbar dem realen Setup auseinandergeschnitten.

Das System von MEYER[19] benötigt zur Berechnung eines Frontzahnsegments mit Bewegung eines Zahnes zwischen 4 und 20 Minuten. Weitere Zeitangaben der anderen Setup-Programme sind der Literatur nicht zu entnehmen.

3.3 Handhabbarkeit

Oberfläche:

Da die Ausgabe am Bildschirm in zweidimensionaler Form erfolgt, ist die räumliche Vorstellungskraft des Benutzers notwendig. Verschiedene Ansichtsfenster sollen den dreidimensionalen Eindruck verbessern. Die technische Entwicklung geht jedoch in die Richtung echter dreidimensionaler Darstellung durch holographische Monitore und virtuelle Datenbrillen. Im Programm wird eine realitätsnahe Darstellung durch die Verwendung von OpenGL® erreicht. Die hohe Punktdichte von 2000 Punkten pro Zahn und die Interpolation der Farben an den Dreiecksflächen durch Übergabe von Punktnormalvektoren an OpenGL® führen zu weicheren Konturen an den Zähnen und somit der besseren Darstellung.

Das beliebige Positionieren von Betrachterstandpunkt und Objektpunkt ist zwar kompliziert, aber durch Eingabe von absoluten Werten möglich. Eine Verbesserung der Zahnpositionierung ließe sich durch Einbindung von Maus oder Datenhandschuh erreichen. Die Lupenansicht sowie die Möglichkeit, einzelne Zähne abzuschalten, transparent darzustellen, die ursprüngliche und veränderte Zahnposition gleichzeitig darzustellen, erweitern die Möglichkeiten der Darstellung gegenüber dem realen Setup erheblich. Die Darstellung von Ebenen und des Bemaßungswerkzeuges zur Zahnbewegung und Rotation sind Verbesserungen gegenüber dem realen Setup. Sowohl in den Bereichen der Darstellung und der Auflösung sind starke Verbesserungen gegenüber den computerisierten Setups von BIGGERSTAFF[3] und BURSTONE[5,6] mit zirka 6 Punkten pro Zahn und MEYER[19] mit zirka 50 Punkten pro Zahn gelungen. Diese Systeme stellen die Zähne nur als Kantenobjekte dar. Das computerisierte Setup von KURODA[16] stellt die Zähne wie im vorliegendem Programm als Oberflächenobjekte dar. Für jede Zahnkrone werden etwa 1500 Punkte erfasst.

Artikulation:

Anstelle einer gleichmäßigen Kontaktbahn werden Einzelschritte angezeigt. Damit können jedoch störende Interferenzen deutlicher identifiziert werden. Die Kontaktpapierdicke ist beliebig einstellbar. Es wird eine Artikulationsbewegung wie beim SAM®-Artikulator simuliert. Es ist keine BENNETTsche immediate side shift möglich, ebenso keine Individualisierung der Kiefergelenksbahn. Hier zeigt sich weiterer Entwicklungsbedarf, um Daten zur Individualisierung der Kiefergelenksbahnen beispielsweise durch Einbindung von Artikulationscomputern[4] verwenden zu können. Voraussetzung hierfür wäre die Installation einer Schnittstelle im Programm und Festlegung eines Datenformates zur Übertragung der individuellen Kiefergelenksdaten.

Kein anderes computerisiertes Setup besitzt die Möglichkeit der Artikulationsprüfung. Allein die Systeme zur Zahnersatzherstellung wie CEREC und CICERO bieten solch eine Option durch Einbindung von Zahnbibliotheken an[2].

Rotation:

Es ist keine Änderung der Rotationsachse am Zahn möglich. Will man um eine andere Achse rotieren, muß man dies durch Rotation um die festgelegten Rotationsachsen und Verschiebung entlang derselben vornehmen. Die Anzeige erfolgt in ganzzahliger Gradeinstellung.

Verschiebung:

Die Verschiebung erfolgt entlang der Zahnachsen entsprechend der zahnärztlichen Richtungsbezeichnungen für die Zähne (zum Beispiel mesial oder oral). Eine körperbezogene Richtung wie frontal oder rechts muß durch eine Kombination dieser Verschiebungen erfolgen.

Kontaktpunktsuche:

Die Kontaktpunktsuche ist eine Kombination aus Verschiebungen und Rotationen des aktiven Zahnes. Man erreicht damit vier oder mehr Kontaktpunkte eines Zahnpaares, die allerdings dicht beieinander liegen können, so daß der Anwender diese unter Umständen nicht differenzieren kann. Da die Berechnung sehr zeitaufwendig ist, würde hier eine Optimierung der mathematischen Algorithmen eine Verbesserung darstellen. In diesem Bereich bietet kein anderes Programm für computerisierte Setups eine Lösung an.

3.4 Ungelöste Probleme

Da das vorliegende Programm einen kieferorthopädischen Setup simulieren soll, wurden weitere Möglichkeiten nicht implementiert. Für folgende Bereiche bieten sich Lösungen an, die einer weiteren Programmentwicklung vorbehalten bleiben.

Das Programm enthält keine Modellanalyse und keine Zahnbogenidealisierungen.

Es werden Röntgenaufnahmen sowie CTs nicht mit eingebunden.

Da im Programm „VirtSet“ Zähne und Kiefer nur als Oberflächenmodelle beschrieben werden, ist es hier nicht möglich, Kräfte und Bewegungssysteme einzubinden. Dazu wäre die Übertragung der jeweiligen Zahn- und Kieferdaten vom Oberflächen- in ein Volumenmodell notwendig.

Es werden keine Milchzähne berücksichtigt.

Das Programm enthält keine Möglichkeit, okklusale Einschleifmaßnahmen vorzunehmen.

Es existiert keine Online-Hilfe für den Benutzer. Die vorliegende Arbeit bietet eine Programmbeschreibung an.

3.5 Praxisreife

Das mühsame Erfassen der Beispieldaten (ca. 1 Tag pro Zahn oder Kiefer) läßt sich nicht auf eine reale Patientensituation übertragen.

Das Programm von TOMOCHIKA[27] erlaubt die computerisierte Einbindung eines Lasertriangulationsverfahren und eines Zahn-CTs. Diese Möglichkeit in Verbindung mit einem Programm, das selbständig aus der ermittelten Punktemenge Kiefer, Zähne mit ihren Wurzeln und Randbereiche wie die Kieferhöhlen separiert, würde die Voraussetzung für den praktischen Einsatz des Programmes „VirtSet“ bieten.

Es bedarf dazu noch der Einbindung einer Modellanalyse und weiterer Automatisierungen wie Zahnbogenidealisierungen in das Programm.

Mit zunehmender Rechengeschwindigkeit der Hardwarekomponenten steigt die Bedienerfreundlichkeit des Programmes.

Die Vorteile des computerisierten Setups gegenüber dem realen Setup liegen in genauen Angabe der getätigten Veränderungen im Bereich der Zahnstellung und Reduktion an der Zahnform durch Strippen sowie im Vergleich verschiedener Stadien einer kieferorthopädischen Behandlung mit der Ausgangssituation.

4 Zusammenfassungen

4.1 Zusammenfassung

Es wird ein selbst entwickeltes Programm für Personalcomputer zur Simulation eines kieferorthopädischen Setups vorgestellt. Das Programm arbeitet mit einem Beispieldatensatz, der mikroskopisch gewonnen wurde. Mit dem Programm „VirtSet“ lassen sich Zähne unabhängig voneinander positionieren, da sie sich auf eigene Koordinatensysteme beziehen. Die Ausrichtungen dieser Koordinatensysteme entsprechen den zahnärztlichen Richtungsbezeichnungen. Das Programm bietet eine halbautomatische Positionierung zu den mesialen und distalen Nachbarzähnen und zu den Antagonisten an. Das Programm erlaubt es, eine Zahnstellung mit mindestens vier antagonistischen Kontaktpunkten zu berechnen. Befinden sich beim Positionieren der Zähne Wurzelanteile außerhalb der Alveolarknochen, so wird dies dargestellt.

Ferner wird ein Werkzeug zur exakten Positionierung der Zähne angeboten. Man kann die Zähne derart positionieren, daß sich Zahnanteile überlappen, und diese dann in einem speziellen Programmteil strippen. Zähne lassen sich extrahieren. Alle Änderungen an den Zähnen und deren Stellungen lassen sich rückgängig machen. Es wird ein halbindividueller Artikulator simuliert, mit dem man Protrusions-, Laterotrusions- und Okklusionsbewegungen realitätsnah darstellen kann. Mit virtuellem Kontaktpapier verschiedener Stärke lassen sich unterschiedliche Kontaktsituationen darstellen. Die Ausgabe erfolgt am Bildschirm in photorealistischer Darstellung.

Es lassen sich diverse Einstellungen vornehmen, so daß man verschiedene Flächenarten wie zum Beispiel Zahnkronen-, Wurzel-, Kontaktpunkt- oder Artikulationsflächen differenzieren kann. Der Artikulator läßt sich von verschiedenen Seiten betrachten. Es lassen sich Bereiche unbegrenzt vergrößern und verkleinern. Die Darstellung auf dem Bildschirm läßt sich auf einem Drucker ausgeben, ebenso die Maße der durchgeführten Rotationen und Verschiebungen bezogen auf die zahn- und kieferspezifischen Achsen. Die Genauigkeit der Berechnungen liegt bei einem Mikrometer.

4.2 Summary

A computer program for simulating an orthodontic set up is presented. It seeks to offer a precise and practical contribution to computer-animated tools for orthodontics. The program is based on an exemplary set of data which was obtained microscopically. As a special feature, the teeth can

be positioned independently as they refer to their own coordinate system. The alignments correspond to the dental nomenclature, for instance mesial, oral, apical. Moreover, antagonists and neighbouring teeth can be positioned semi-automatically. It is possible to calculate and present a minimum of four antagonistic contact points for each pair of teeth. If parts of the roots are outside the alveolar bone these are illustrated graphically.

As another feature, the program offers a tool for an exact positioning of the teeth. Teeth can be positioned in an overlapping arrangement and subsequently can be stripped interdentally. The user can also extract teeth. Any changes of teeth and their positions can be reversed. Moreover the program allows to simulate a semi-individual articulator depicting protrusive, laterotrusive and occlusive movements authentically.

The user can identify different contact points with the aid of virtual articulation foil.

Besides, the program offers several application-oriented features: All computer-animated pictures have photographic qualities. That allows differentiations between various surface areas, such as crown, root, occlusal contact and articulation surfaces. The articulator can be looked at from different points of view. All areas can be zoomed in and out without limitations. Both the depictions and the measures of taken rotations related to the axes of individual teeth can be printed in full. The precision of all calculations is about one micrometer.

5 Literaturverzeichnis

- [1] Andrews, L.F.: Straight Wire. L.A. Wells Co, San Diego (1989)
- [2] Becker, J.: CAD/CAM in der Zahnmedizin. ZWR 105 (1996) S. 119-125, S. 188-192
- [3] Biggerstaff, R.H.: Computerized Diagnostic Setups and Simulation. Angle Orthod 40 (1970) S. 28-36
- [4] Burckhardt, R.: Elektronische Registriermethoden zur Aufzeichnung der Unterkieferbewegungen. Magazin f. Zahnheilkunde, Management und Kultur 7 (1991) S. 6-14
- [5] Burstone, C.J.: The use of the computer in orthodontic practice. Part 1. J Clin Orthod 13 (1979), S. 442-453
- [6] Burstone, C.J.: The use of the computer in orthodontic practice. Part 2. J Clin Orthod 13 (1979), S. 539-555
- [7] Drescher, D.: Praechirurgische kieferorthopädische Planung. In: Schmuth, G.P.F. (Hrsg.): Praxis der Zahnheilkunde, Urban & Schwarzenberg, München-Wien-Berlin, Bd. 11, 2. Auflage (1990), S. 162-164
- [8] Drescher, D.; Holtkamp, C.: Die Herstellung des diagnostischen Set up. Quintessenz der Zahntechnik 16 (1990) S. 1341-1351
- [9] Gellert, W.: Kleine Enzyklopädie Mathematik. Harri Deutsch, Thun (1977)
- [10] Kernighan, B.; Ritchie, D.: The C Programming Language. Prentice-Hall, Inc. (1977)
- [11] Kernighan, B.; Ritchie, D.: Programmieren in C. Hanser, Wien (1983)
- [12] Kesling, H.D.: The Diagnostic Setup with Considerations of the Third Dimension. Am J Orthod 42 (1956) S. 740-748
- [13] Kesling, H.D.: The tooth positioner as the means of final positioning of teeth to a predetermined pattern. J Dent Child 11 (1944) S. 103-105
- [14] Kesling, H.D.: The philosophy of tooth positioning appliance. Am J Orthod 31 (1945) S. 297-304
- [15] Köhler, J.; Höwelmann, R.; Krämer, H.: Analytische Geometrie und Abbildungsgeometrie in vektorieller Darstellung. Diesterweg Salle, Frankfurt a. M. (1975)
- [16] Kuroda, T.; Motohashi, N.; Tominaga, R.; Iwata, K.: Three-dimensional dental cast analyzing system using laser scanning. Am J Orthod Dentofac Orthop 110 (1996) S. 365-369
- [17] Marxer, H.: Set up. Inf Orthod Kieferorthop 17 (1985) S. 365-374
- [18] Mertens, F.: Computerprogramm zur Konstruktion von Zahndaten. Berlin 1989-1990 (unveröffentlicht)
- [19] Meyer, R.S.; Bachmann, K.; Harmsen, B.: Computersimulation orthodontischer Zahnbewegungen. Fortschr Kieferorthop 51 (1990) S. 238-242
- [20] Mühling, J.; Haßfeld, S.; Zöller, J.: Der Computer hilft beim Operieren. Zahnärztl Mitt,

- 87 (1997) S. 26-32
- [21] Opitz, Ch.; Miethke, R.-R.; Jost-Brinkmann, P.-G.: Abschlußbericht zum Forschungsprojekt „Computergestützte kieferorthopädische Modellanalyse (CAMA)“ der Freien Universität Berlin und der Humboldt-Universität zu Berlin. Volkswagen Stiftung Az: I / 65 811
- [22] Proffit, W.R.: Contemporary Orthodontics. C. V. Mosby, St. Louis (1986)
- [23] C3D Software for the REFLEX MIKROSCOPE, User Manual. The REFLEX MICROSCOPE, Operation and Maintenance. Reflex Measurement Limited: Hadleigh House, Butleigh, Sommerset, GB, (1995)
- [24] Sergl, H.G.: Idee und Anwendungsbereich des Idealisators. Prakt Kieferorthop 2 (1988) S. 11-18
- [25] Schormann, C.: Bilderspiele – Licht. ST Computer (1988) *Heft 6*, S. 89-97
- [26] Schormann, C.: Bilderspiele - Graphikkurs. ST Computer (1987-1988) *Heft 11-4*
- [27] Tomochika, A.; Ishikawa, H.; Nakamura, S.: Development of the three-dimensional analysing system for the dentoalveolar region using the system for the shape measurement of dental cast. J Jpn Orthod Soc 54 (1995) S. 264-273
- [28] Vardimon, A.D.: Das diagnostische Set up. 1. Teil: Dentoalveoläre Diskrepanzen. Fortschr Kieferorthop 47 (1986) S. 141-156
- [29] van der Zel, J.M. : CAD/CAM Restaurationen in Okklusion. ZWR 103 (1994) S. 420-425

Anhang

Danksagung

Für die Überlassung der vorliegenden Arbeit und die wissenschaftliche Betreuung bin ich Herrn PD Dr. P.-G. Jost-Brinkmann sehr zu Dank verpflichtet.

Herrn A. Bartels gilt mein Dank für die technische Betreuung dieser Arbeit.

Für die Nutzung des „Reflex Mikroskope“ danke ich Frau Prof. Dr. Ch. Opitz.

Meinen Eltern danke ich für die Unterstützung meiner beruflichen Karriere.

Ich danke meiner Frau für Ihre Geduld und Unterstützung.

Curriculum vitae

5. 10. 1965 Geboren in Berlin-Wilmersdorf
- 1971 - 1983 Schulbesuch in Berlin-Wilmersdorf
7. 12. 1983 Abitur
- 1984 - 1986 Externes Studium der Zahnheilkunde an der FU Berlin
- 1986 - 1990 Studium der Zahnheilkunde an der RWTH Aachen und an der FU Berlin
- Februar 1989 Übernahme des Themas der vorliegenden Arbeit
31. 7. 1990 Approbation als Zahnarzt
- 1990-1994 Tätigkeit als Assistenz Zahnarzt in freier Praxis in
 Köln und Berlin
- August 1995 Erstellung der Beispieldaten
- seit Juli 1994 Zahnarzt in eigener Praxis in Berlin-Schöneberg

Selbständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich **an Eides Statt**, daß die vorgelegte Dissertation von mir selbst und ohne die unzulässige Hilfe Dritter verfaßt wurde, auch in Teilen keine Kopie anderer Arbeiten darstellt und die benutzten Hilfsmittel sowie die Literatur vollständig angegeben wurden.

Berlin, den 15.12.1998

gez. Frank Mertens

Glossar:

- **Ambientes Licht:** Ungerichtetes Umgebungslicht, das von überall herkommt und überall hingestrahlt wird.
- **ANSI:** American National Standards Institute
- **ASCII:** American standard code for information interchange, internationaler Zeichensatz
- **BENNETTsche immediate side shift:** initiale Bewegung des Kondylus der Mediotrusionsseite nach median bezogen auf die Horizontalebene bei der Laterotrusion.
- **Byte:** Speicherzelle zur Kodierung von 2^8 verschiedenen Zuständen
- **CAMPERsche Ebene:** Ebene zwischen der spina nasalis anterior und den rechten und linken pori acustici externi.
- **CRAMERsche Regel:** Regel zur Lösung eines linearen Gleichungssystems von n Gleichungen mit n Unbekannten.
- **DATE-Struktur:** Die DATE-Struktur wird als 8 Byte Fließkommazahl gespeichert. Sie kann Daten vom 1.1. des Jahres 100 n. Chr. bis zum 31.12. des Jahres 9999 repräsentieren. Die ganzzahlige Nummer stellt die Anzahl der Tage vor oder nach dem 30.12.1899 (Basis Null) dar. Die DATE-Struktur wird von OLE definiert
- **Diffuses Licht:** Gerichtetes Licht, das aus dem Unendlichen in eine bestimmte Richtung strahlt.
- **Emission:** Licht, das ein Körper aktiv abgibt.
- **Fensterkoordinaten:** Koordinaten der zweidimensionalen Bildschirmfenster.
- **FIPS:** Federal Information Processing Standards
- **Frankfurter Ebene:** Ebene, die durch beide Infraorbitalpunkte und die oberen Pole der pori acustici externi verläuft.
- **GAUßsche Formel:** Regel zur Berechnung des Flächeninhalts A eines Polygons:

$$A = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (x_i - x_j) * (y_i + y_j)$$

- **HESSEsche Normalenform der Ebene:** Eine Ebenengleichung bestehend aus dem Normaleneinheitsvektor und dem Abstand der Ebene vom Ursprung.

- **ISO:** International Organization of Standardization
- **Korkenzieherregel:** Sind drei Punkte einer betrachteten Fläche im Uhrzeigersinn (mathematisch negativer Drehsinn oder Einschraubrichtung eines Korkenziehers) verbunden, so betrachtet man die Außenfläche dieser Fläche.
- **Matrizes:** Rechenregeln, die der Koordinatentransformation dienen.
- **Modellkoordinaten:** Die Koordinaten des Zahn- oder Kieferobjektes. Das Koordinatensystem eines Zahnes ist so ausgerichtet, daß die Z-Achse nach apikal und die X-Achse nach mesial weist.
- **MÖBIUSSches Band:** Ein einfach verdrehtes Band mit nur einer Fläche.
- **Objektpunkt:** (view reference point: VRP) Dieser Punkt wird in ein virtuelles Objekt gelegt, zu dem der Betrachter blicken möchte. Aus dem Betrachterstandpunkt und diesem Punkt wird ein Sichtwürfel errechnet, der auf das Bildschirmfenster übertragen wird.
- **OLE:** Object Linking and Embedding. Eine Programmier Technologie, die es erlaubt, Objekte eines Programmes anderen Anwendungen zur Verfügung zu stellen.
- **Quader:** Ein Polyeder, der acht rechtwinklige Ecken besitzt und zwölf Kanten, von denen je vier gleich lang sind.
- **RAM:** Random access memory, Haupt- und Arbeitsspeicher eines Computers.
- **Standardspezialpunkte:** Spezialpunkte, denen die Hauptbewegungsrichtungen zugeordnet sind. Diese liegen auf den Koordinatenachsen:

MES_APP	=	mesialer Approximalpunkt, auf der positiven X-Achse
DIST_APP	=	distaler Approximalpunkt, auf der negativen X-Achse
ORAL	=	oraler Punkt, auf der positiven oder negativen Y-Achse
VEST	=	vestibulärer Punkt, auf der negativen oder positiven Y-Achse
APIK	=	Apexpunkt, auf der positiven Z-Achse
OKK_INZ	=	okklusaler oder inzisaler Punkt, auf der negativen Z-Achse
- **Spekulares Licht:** Punktlicht, das von einer Position aus in alle Richtungen strahlt.
- **Spezialpunkte:** Bezeichnete Punkte, die der Orientierung des Koordinatensystems eines virtuellen Zahns oder Kiefers dienen.

- **Spotlicht:** Licht, das eine Position, eine Richtung, einen Abschwächungskoeffizienten und einen Strahlwinkel besitzt.
- **Symmetriepunkt:** Dieser Punkt wird zum Mittelpunkt des zu berechnenden Objektes, indem dieses um den Vektor, der sich vom alten Ursprungspunkt zum Symmetriepunkt erstreckt, verschoben wird.
- **Weltkoordinaten:** Die Koordinaten der Zähne und Kiefer, die eine virtuelles Bild der Welt bilden.

Programm

Das anliegende Programm „Virtarj.exe“ enthält in komprimierter Form das Programm „Virtset.exe“ und einen Beispieldatensatz.

Bitte kopieren Sie das Programm „Virtarj.exe“ in ein temporäres Verzeichnis und entpacken sie es.

Im Ordner „Virtset“ im temporären Verzeichnis starten Sie zur Installation das Programm „Setup.exe“. Das weitere Vorgehen ist menügesteuert.

Nach der Installation können Sie den Ordner „Virtset“ löschen.

Verwendete Materialien und Geräte:

Das vorgestellte Programm wurde unter der Verwendung von Turbo C® und Microsoft Visual C++® 1.5 bis 7.0 sowie InstallShield® entwickelt.

Als Computer wurden bei der Entwicklung des vorliegenden Programms verwendet:

- Atari® 1040 ST
- 486er 66 MHz Intel®-basierender Computer
- 586er 120 MHz Intel®-basierender Computer
- 686er 350 MHz Intel®-basierender Computer
- Laptop Dell® Latitude 433c

Zur Erfassung der Beispieldaten wurde verwendet:

- Reflex Mikroskop der Firma REFLEX MEASUREMENT LIMETED, Hadleigh House, Butleigh, Somerset, BA6 8SP, U.K., der Abteilung für Kieferorthopädie und Orthodontie des Zentrums für Zahnmedizin der Humboldt-Universität zu Berlin.

Dieses Dokument wurde mit dem Textverarbeitungsprogramm Microsoft Word 97® und den Graphikprogrammen Microsoft Photoeditor 3.0® und Fuji Designer 1.0® verfaßt.

Eingetragene Warenzeichen:

OpenGL ist ein eingetragenes Warenzeichen von Silicon Graphics, Inc.

Intel, Pentium und i486 sind eingetragene Warenzeichen von Intel Corporation.

VISUAL C++, WINDOWS NT, Microsoft, MS, MS-DOS, WINDOWS, Microsoft Word, Winword und Microsoft Photoeditor sind eingetragene Warenzeichen von Microsoft Corporation.

FUJI Designer ist ein eingetragenes Warenzeichen von FUJI Magnetics GmbH.

Atari ist ein eingetragenes Warenzeichen von Atari, Inc.

Dell ist ein eingetragenes Warenzeichen von Dell, Inc.

Frasaco ist ein eingetragenes Warenzeichen der Firma Franz Sachs und Co.

SAM ist ein eingetragenes Warenzeichen der SAM GmbH.

Straight Wire ist ein eingetragenes Warenzeichen der Straight Wire A-Company.

Turbo C ist ein eingetragenes Warenzeichen von Turbo C, Inc.

InstallShield ist ein eingetragenes Warenzeichen von InstallShield Software Corporation.